



VŠB - Technická univerzita Ostrava

Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství

Katedra materiálů a technologií pro automobily



Disertační práce

Testování materiálů pro použití na konstrukční části elektromotoru

Testing Materials for Structural Parts of the Electric Motor

Doktorand

Ing. Radim Čech

Školitel

doc. Ing. Petr Tomčík, Ph.D.

Studijní program

Materiálové vědy a inženýrství (P3924)

Rok

2016



Anotace

V této disertační práci jsou popsány vlivy elektromagnetického pole na konstrukční materiály moderního elektromotoru s axiálním tokem. Hlavním cílem je vývoj metodiky testování materiálů pro konstrukční části elektromotorů. Jedním z aspektů byla eliminace vířivých proudů v konstrukčních částech na základě řízené volby materiálu. Dále je zde uveden návrh, výpočet a výroba experimentálního elektromotoru coby testovacího zařízení pro testování materiálů, na kterém byla realizována vlastní experimentální část práce. Krátká část je věnována ověření hypotézy vlivu vířivých proudů na části stroje metodou konečných prvků. V práci jsou uvedeny také ověřovací zkoušky fyzikálních vlastností jednotlivých konstrukčních materiálů. Experimentální část se věnuje měřicí soustavě, metodice a experimentům testování zvolených materiálů.

Annotation

This dissertation describes the influence of the electromagnetic field on structural materials of a modern axial-flow electric motor. The main aim is the development of equipment for testing of materials structural parts for electric motors. One aspect of this paper is to eliminate eddy currents in structural elements through regulated selection of materials. This paper also presents a proposal, calculation and manufacture of an experimental axial-flow electric motor, which was used for testing purposes, as the basis of the experimental section of the dissertation. A short part is dedicated to verifying the hypothesis of eddy currents impacting parts of the machine, using finite element method. The dissertation further outlines tests aimed at verifying physical properties of various construction materials. The experimental part then deals with the measuring system, methodology and experiments dedicated to testing of selected materials.



Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval svému školiteli doc. Ing. Petru Tomčíkovi, Ph.D. za odborné vedení, rady a četné konzultace. Dále bych velice rád poděkoval svým kolegům z Katedry materiálů a technologií pro automobily za všeobecnou pomoc v průběhu tvorby práce.

Seznam použitých jednotek a zkratk

1) Jednotky

Značení	Název	Jednotka
2p	Počet pólových dvojic	-
n	Jmenovité otáčky	ot·min ⁻¹
s	Počet cívkových stran	-
μ_r	Relativní permeabilita	-
μ	Permeabilita	-
μ_0	Permeabilita vakua	$4\pi \times 10^{-7} \text{ H / m}$
ρ	Rezistivita – měrný elektrický odpor	$\Omega \cdot \text{m}^{-1}$
σ	Konduktivita – měrná elektrická vodivost	$\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$
k_f	Koeficient tření v ložiscích	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
φ	Magnetický tok	Wb
U_i	Indukované napětí	V
M	Elektromagnetický moment	Nm
P_{el}	Elektromagnetický výkon	W
R	Odpor	Ω
P_c	Celkové magnetické ztráty	W
P_v	Ztráty vířivými proudy	W
P_h	Ztráty hysterezní	W
P_p	Ztráty přídavné	W
P_{rot}	Mechanické ztráty	W
P_{in}	Příkon motoru	W



Pout	Výkon motoru	W
η	Účinnost motoru	%
Mk	Točivý moment motoru	Nm
F	Síla	N
B	Magnetická indukce	T
f	Frekvence	Hz
V	Objem	m ³
S	Plocha	m ²
ϵ_F	Indukované elektromotorické napětí	V
ϕ	Magnetický tok	Wb
t	Čas	s
H	Intenzita magnetického pole	A·m ⁻¹
T	Teplota	°C, K
l	Délka	m
E	Energie	J
Rp0,2	Smluvní mez kluzu	MPa
Rm	Mez pevnosti	Mpa
l _g	Vzduchová mezera	mm
A	Tažnost	%
Z	Kontrakce	%
H _C	Koercitivní síla	kA/m
B _R	Remanentní magnetická indukce	T
Q	Počet cívek motoru	-



N	Počet závitů	-
M_z	Záběrný moment	Nm
m_{MAX}	Maximální hmotnost	kg
ε_M	Přetížitelnost stroje	-
k_w	Činitel vinutí	-
Φ	Magnetický tok	Wb
S_v	Průřez vodiče	mm ²
ρ	Hustota materiálu	Kg/m ³



2) Zkratky

Zkratka	Název
EN	Norma evropského společenství
SCX	Student Car SCX
KMTA	Katedra materiálů a technologií pro automobily
Axiální motor	Synchronní motor s axiálním magnetickým tokem a permanentními magnety ze vzácných zemin
IEC	Norma Mezinárodní elektrotechnické komise
DC	Stejnoseměrný proud
AC	Střídavý proud
RD	Ve směru válcování
TD	Příčný směr k válcovanému
CNT	Karbonová nanotrubička
MWNT	Více stěnná nanotrubička
PWM	Pulzně šířková modulace
J	Jižní pól magnetu nebo cívky
S	Severní pól magnetu nebo cívky
AlCu4PbMgMn	Hliníkový materiál pro experiment
X2CrNi18-9	Materiál z nerezové oceli pro experiment
EP GC 201	Sklotextitový materiál pro experiment



AISI	Americký institut železa a oceli
BMS	Systém bateriového managementu
PWM	Pulzně šířková modulace



Obsah:

1	ÚVOD	13
2	SOUČASNÝ STAV	15
2.1	Rozložení ztrát v motoru	16
2.2	Popis koncepce vývojového axiálního motoru	19
2.3	Aktuální trendy eliminace ztrát v elektropohonech	20
2.3.1	Mechanické ztráty	20
2.3.2	Ztráty ve vinutí motoru	21
2.3.3	Ztráty v magnetickém obvodu	22
2.4	Kvalifikace ztrát v magnetickém obvodu motoru	23
2.4.1	Ztráty vířivými proudy	24
2.4.2	Ztráty hysterezní	26
2.5	Faktory ovlivňující magnetické ztráty v materiálu	27
2.5.1	Vlivy teploty	27
2.5.2	Vliv napětí v materiálu	28
2.5.3	Vliv chemického složení	32
2.5.4	Vliv struktury	35
2.5.5	Vliv velikosti zrn	37
2.6	Popis axiálního motoru	38
3	VÝCHODISKA PRO VLASTNÍ VÝZKUM	44
4	EXPERIMENTÁLNÍ PLÁN	46
5	CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	47
6	PŘÍPRAVA EXPERIMENTU	48
6.1	Návrh materiálů pro ložiskové desky	48
6.1.1	Volba hliníkové slitiny pro ložiskové desky	48
6.1.2	Volba oceli pro ložiskové desky	51
6.1.3	Volba kompozitu pro ložiskové desky	54
6.2	Kontrola fyzikálních vlastností navržených materiálů	56
6.2.1	Mikrostruktura navržených vzorků	56



Materiál AlCu4PbMgMn	57
Materiál X2CrNi18-9	60
Materiál EP GC 201	62
6.2.2 Mechanické zkoušky navržených vzorků	63
Tahová zkouška	63
Měření tvrdosti dle Brinella HBW2,5/31,25	70
Měření tvrdosti dle Brinella HBW2,5/62,5	72
6.2.3 Zkouška elektrických vlastností	73
Měření BH charakteristiky	74
6.3 Vývoj experimentálního axiálního motoru	75
6.3.1 Varianty řešení, konstrukční uspořádání stroje	75
6.3.2 Magnetický obvod axiálního motoru s dvojitém vnějším rotorem	77
6.3.3 Vinutí statoru axiálního motoru s dvojitém vnějším rotorem	81
6.3.4 Zapojení 3f vinutí statoru	81
6.3.5 Základní rozměrový výpočet axiálního stroje	83
Určení základních parametrů motoru, definice vztahů	85
6.3.6 Rozměrový výpočet axiálního elektromotoru	88
6.3.7 Řešení magnetického pole axiálního stroje	91
6.3.8 Řešení magnetického pole ve stavu naprázdno	92
6.3.9 Výpočet momentové charakteristiky motoru	95
6.3.10 Model motoru, výpočet hmotností součástí	98
6.4 Analýza metodou konečných prvků (MKP)	98
6.4.1 Optimalizace 3D modelu pro výpočet MKP	100
6.4.2 Vypočítané ztráty v ložiskových deskách metodou MKP	100
6.5 Výroba motoru pro testování	102
6.5.1 Volba materiálů a technologií	102
Magnety	102
Somaloy	103
Drát statoru	103
Chemická kotva	103



6.5.2	Výroba jednotlivých částí	105
	Obráběné díly	105
	Elektronické obvody	107
6.5.3	Výroba statoru	109
	Lepení pólů a cívek	109
	Propojení cívek	109
	Izolace	110
	Uzavření statorového celku	111
	Montáž snímače polohy a kryt elektroniky	111
6.5.4	Výroba rotoru	112
6.5.5	Sestavení rotoru	113
6.5.6	Kompletace motoru	114
7	EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ	115
7.1	Popis měřicí soustavy pro měření na motorové brzdě	115
7.1.1	Seznam použitých přístrojů	117
	Motorová brzda SuperFlow SF-902	117
	Měřicí počítač s měřicími a ovládacími softwary	119
	Klešťový ampérmetr UNI-T UT 207	120
	Multimetr UNI-T UT70A	121
	Proudová sonda	121
	Bezdotykový teploměr VA6530	121
	Bateriový pack	122
	Řídící jednotka motoru	122
	Experimentální axiální motor	123
7.1.2	Instalace a zapojení experimentálního motoru na motorovou brzdu	124
7.2	Popis měřicí soustavy pro ověřování v provozu elektromobilu	127
8	VÝSLEDKY MĚŘENÍ	130
8.1	Výsledky měření na motorové brzdě	130
8.1.1	Teplotní průběhy	130
8.1.2	Průběh teploty vinutí statoru motoru	134



8.1.3	Průběh oteplení ložiskových desek	135
8.1.4	Průběh teploty rotoru	136
8.1.5	Výkonová charakteristika experimentálního motoru	137
8.1.6	Průběh účinnosti experimentálního motoru	139
8.2	Výsledky měření při provozu elektromobilu	140
8.2.1	Městský provoz	140
8.2.2	Kombinovaný provoz	141
8.2.3	Dálniční provoz	142
8.2.4	Maximální rychlost.....	143
8.2.5	Akcelerační zrychlení	144
8.2.6	Rekuperační brzdění	145
9	SHRNUTÍ ZÍSKANÝCH POZNATKŮ	146
10	POUŽITÁ LITERATURA.....	150
11	PUBLIKAČNÍ ČINNOST	156
11.1	Funkční vzorek.....	157
11.2	Ověřená technologie	158
11.3	Řešené grantové a rozvojové projekty.....	158
12	SEZNAM TABULEK	159
13	SEZNAM OBRÁZKŮ	160



1 Úvod

Tato práce řeší především volbu materiálu pro výrobu konstrukčních částí elektromotoru s hlavní myšlenkou kladně ovlivnit účinnost stroje. V roce 1865 James Clark Maxwell shrnul všechny současné znalosti o elektromagnetismu do čtyř základních rovnic a rozpoutal tím vývoj elektrických strojů na mnoha frontách. Roku 1872 Werner von Siemens se svým spolupracovníkem vyvíjí první spolehlivý bubnový motor, u kterého redukuje problém vířivých proudů použitím jiného materiálu a tvaru magnetického jádra. (Siemens, 1872).

Až po dalších šedesáti letech byl vynalezen permanentní magnet pomocí slitin niklu, hliníku a kobaltu. Díky novým materiálům se staly permanentní magnety dostupnější. Cena axiálních motorů, které jsou předmětem této práce, klesala a byly tak dostupnější pro více aplikací. V posledních letech jsou axiální stroje upřednostňovány, i nadále však zůstávají oproti jednodušším asynchronním motorům poměrně drahé. Výhodou axiálních motorů je malá axiální délka a schopnost vysokého točivého momentu. Proto se tyto motory používají například bez převodovek v elektromobilech. Oproti jiným točivým strojům mají axiální motory s permanentními magnety ze vzácných zemin vyšší účinnost. I přesto, že se podařilo překonat spoustu problémů s výrobou axiálních strojů, zůstává zde prostor ke zlepšení. Posunout technologii axiálních motorů na základě studia základních materiálových vlastností je podstatou této práce.

Vývojová střediska na základě tlaku legislativ a normativ vyspělých zemí, příkladem může být norma EN 60034-2-1, začala vyvíjet stroje účinnější. Začala vyvíjet technicky pokročilé elektromobily. Podobným projektem je také vývoj vozu StudentCar SCX na katedře materiálů a technologií pro automobily, kterého jsem součástí. Vznikla nejrůznější řešení kombinování spalovacích motorů s elektromotory, zpětné využívání brzdové energie, nové typy baterií, zvýšené účinnosti komponent atd. To mají na svědomí především nové materiály a technologie. Hlavní myšlenkou, jak masově rozšířit bezemisní automobilismus, je vyvinout elektromobily s co nejvyšší účinností a dojezdem, aby doba nabíjení neomezovala uživatele. Tato práce by měla svými výstupy napomoci zvýšení účinnosti a snížení hmotnosti moderních elektrických pohonů pro elektromobilitu. I nepatrné zvýšení účinnosti motoru má vliv na další součásti elektromobilů. Účinnější motor spotřebuje méně elektrické energie, Produkuje méně ztrátového tepla, je zapotřebí méně chladiva, menší oběhová čerpadla a chladiče. Při rekuperaci je přeměněno více mechanické energie v elektrickou.

To má kladný vliv na zvýšení dojezdu. Pokud se podíváme na konkrétní elektromobil StudentCar SCX viz Obr. 1, který má axiální motory celkem čtyři, tyto úspory toku energií jsou multiplikovány. Z matematického modelu tohoto vozu vyplývá, že zvýšení efektivity motorů o 10% zvýší dojezd až o 34km, což odpovídá jedné jízdě do práce a zpět většiny aktivní populace.

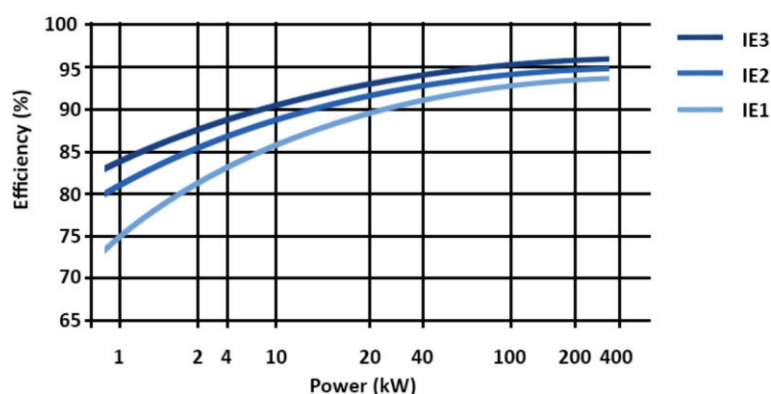


Obr. 1 Elektromobil StudentCar SCX s axiálními motory

V této práci řeším zvýšení účinnosti na základě omezení magnetických ztrát v ložiskových deskách, jakožto základních konstrukčních prvcích axiálního synchronního motoru s permanentními magnety ze vzácných zemin (dále jen axiální motor). V práci uvádím ucelený popis vzniku procesů a jejich průběh, které se podílejí na tvorbě magnetických ztrát v návaznosti na materiálech a jejich vlastnostech. Dále toto ověřuji za pomoci série experimentálních měření, zaměřených na kontrolu účinnosti. Tato měření jsem provedl na speciálně navrženém vývojovém axiálním motoru pro testování na brzdovém stanovišti KMTA.

2 Současný stav

Základním řešeným problémem této práce je snížení úrovně vířivých proudů v konstrukčním materiálu axiálního motoru. Pochopení mechanismu vzniku vířivých proudů na elementární materiálové úrovni je tedy důležité pro řešení tohoto problému. V následující části se pokusím uvést do problematiky konkrétního problému v teoretické rovině.



Obr. 2 Graf tříd účinnosti třífázových nízkonapěťových motorů 0,75 až 375kW (AG, 2016)

Norma Mezinárodní elektrotechnické komise IEC 60034 z roku 2008 ukládá výrobcům elektrických točivých strojů nejnížší možnou účinnost dle grafu na Obr. 2. Na Obr. 3 můžete sledovat rozsah působnosti tohoto standardu. Dá se obecně říci, že je platný pro většinu vyspělých zemí.



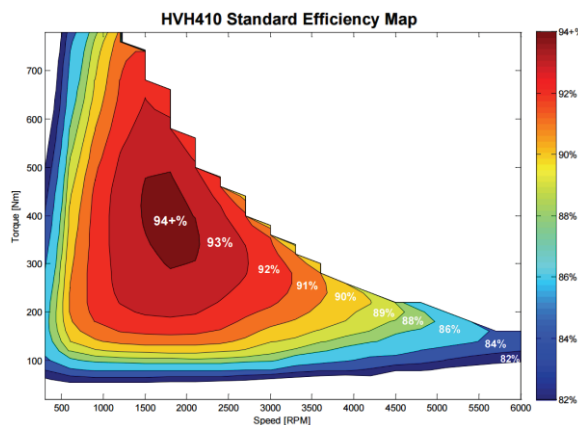
Obr. 3 Rozsah působnosti normativ IEC 60034-30:2008

Z normy vyplývá, že od června 2011 nesmí být motory s účinností IE1 dodávány na evropské trhy. Od počátku roku 2015 musí být pro motory s výkony 7.5 až 375 kW dodržena zákonem stanovená minimální účinnost třídy IE3, případně IE2 pro motory řízenými měniči frekvence. (Holub, 2011)

Z těchto důvodů je důležité a nezbytné navrhovat elektromotory s nejvyšší možnou účinností již od fáze návrhu stroje. Bez toho nemohou být vhodně komerčně využity a nemohou mít konkurenční výhodu na trhu.

2.1 Rozložení ztrát v motoru

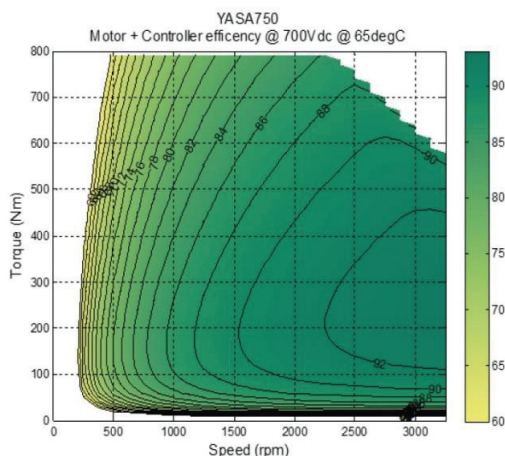
Účinnost elektrického stroje je závislá na mnoha faktorech, které nelze jednoznačně shrnout do uceleného celku. Pokud vyjmenuji jen několik z nich, bude to vliv konstrukce, použitých materiálů, výkonnostní třída stroje, prostředí použití, zdroj napájení a podobně. Na Obr. 4 vidíme mapu účinnosti axiálního motoru americké firmy Remy s označením HVH410 a nominálním výkonem 92 kW a kroutícím momentem 580 Nm při 1000 ot/min. (Remy International, Inc, 2010)



Obr. 4 Mapa účinnosti axiálního motoru REMY HVH410 (Remy International, Inc, 2010)

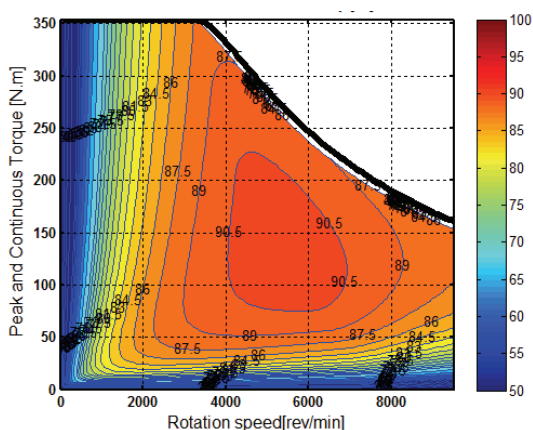
Z Obr. 4 je vidět, že nejvyšší účinnost motoru není ve shodě se jmenovitým kroutícím momentem motoru. Z Obr. 4 je vidět, že motor má pouze omezený rozsah s vysokou efektivitou, která u tohoto motoru dosahuje až 94%. V ostatních provozních stavech je ale efektivita nižší, a pokud motory využíváte v plném rozsahu, například bez použití převodovek, účinnost je mnohem nižší než zmiňovaná hranice.

V nízkých otáčkách a nízkém zatížení může být účinnost takového motoru kolem 50% viz Obr. 5 a Obr. 6. Z naměřených dat viz. (GIERAS, 2004), je vidět, že účinnost může klesat i pod 50%.



Obr. 5 Mapa účinnosti axiálního motoru YASA 750 (Limited, 2016)

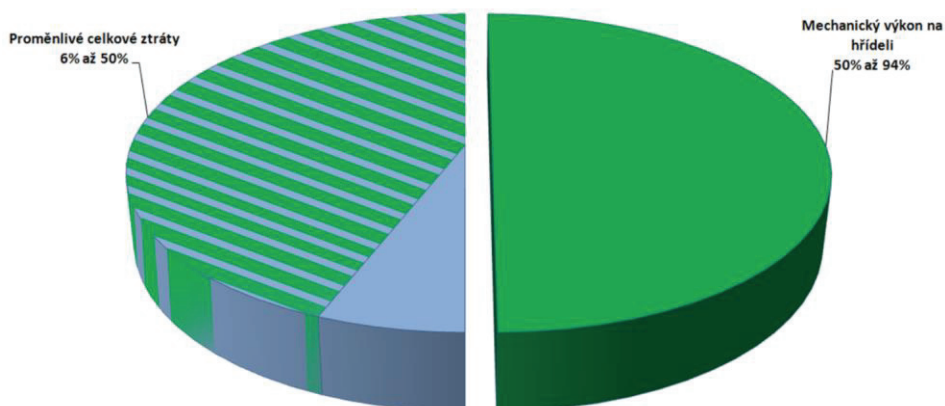
Na Obr. 5 uvádím mapu účinnosti axiálního motoru firmy YASA s označením 750 z Velké Británie. Zde můžeme sledovat maximální efektivitu 92%. Co je zajímavější, zde výrobci ukazují mnohem nižší otáčkový rozsah, ale mapu mají ohraničenou mnohem reálněji než firma Remy, a to nejnižší účinností 60%. Je zřejmé, že motory i za hranicí této mapy musí fungovat, ale jejich účinnost je velice nízká. V Obr. 6 je vidět plná mapa účinnosti motoru, jak by měla být správně udávána, zde je vidět, že rozsah účinnosti je dotažený do hrany x-ové i y-ové osy.



Obr. 6 Ukázka mapy účinnosti s plným rozsahem motoru (F. Badin1, 2015)

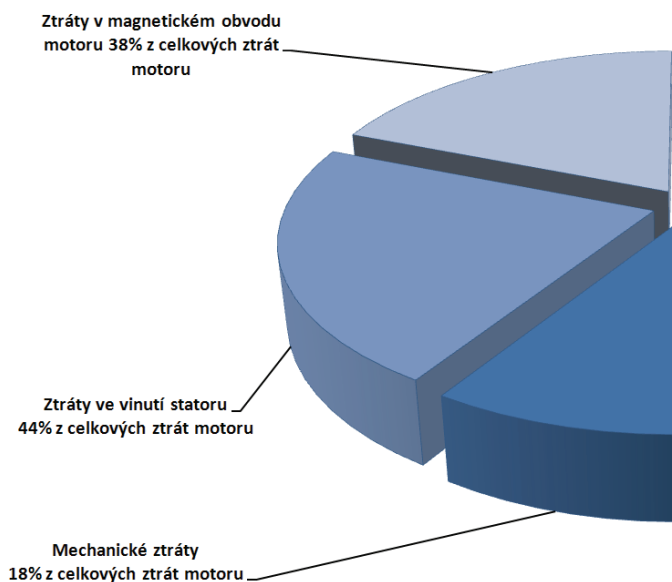
Z výše popsaného tedy vyplývá, že celkové ztráty axiálních motorů se pohybují v rozmezí od cca 6% do závratných 50%.

Na Obr. 7 je graficky znázorněno toto rozložení celkových ztrát včetně proměnlivých celkových ztrát v závislosti na provozním stavu motoru.



Obr. 7 Rozložení celkových ztrát v axiálním motoru v závislosti na provozním stavu (Clifford, a další, 2013)

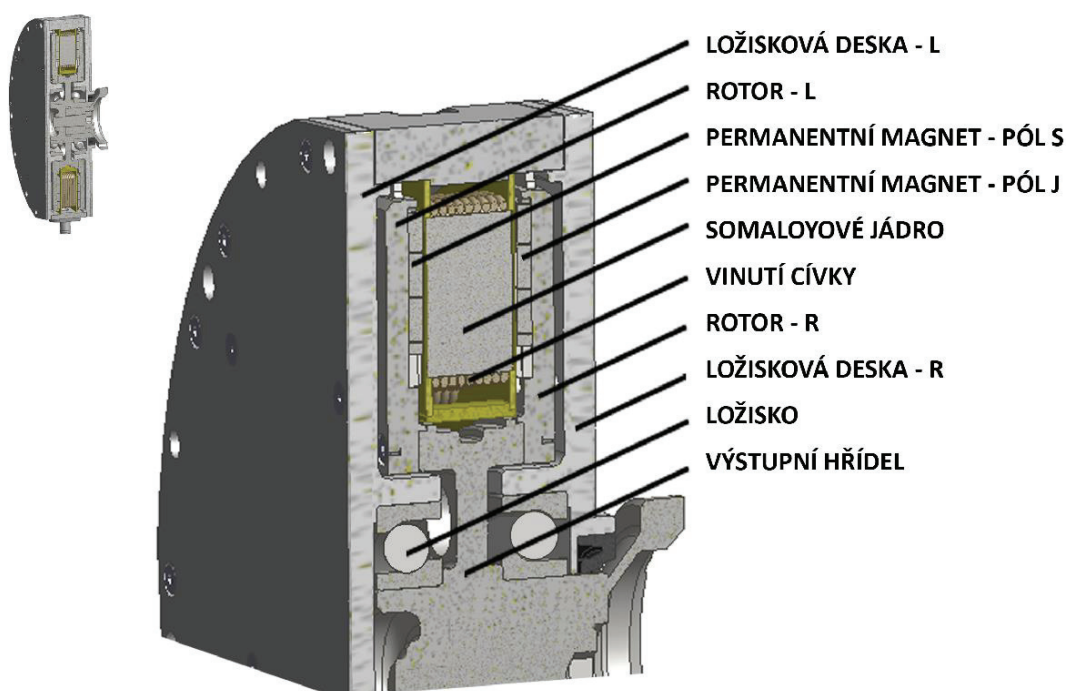
Tyto celkové ztráty motoru se dále dělí na ztráty mechanické, ztráty v materiálu, tzn. ztráty ve vinutí statoru a ztráty v magnetickém obvodu viz Obr. 8.



Obr. 8 Rozdělení celkových ztrát v axiálním motoru (Clifford, a další, 2013)

2.2 Popis koncepce vývojového axiálního motoru

Pro zavedení do problematiky je důležité seznámení se s koncepcí vývojového axiálního motoru, který bude pro řešení disertační práce navržen a ve formě funkčního vzorku postaven. Na Obr. 9 je čtvrtěčný řez axiálním motorem s dvojitým vnějším rotorem. Popis ukazuje jednotlivé části motoru. Základním konstrukčním prvkem jsou zde levá a pravá ložisková deska, ty vymezují vůle mezi pravým a levým rotorem a tělem statoru. Také uzavírají funkční prostor motoru.



Obr. 9 Řez axiálním motorem a popis jeho částí

Chrání vnitřní části motoru před vnějšími vlivy. Přenáší odpadní teplo do okolí motoru. Přenáší silové působení ne-vývažků rotoru v radiálním směru a silové působení rotoru vlivem nerovnoměrné vzduchové mezery ve směru axiálním. Tato práce se těmito ložiskovým deskám bude silně věnovat, zejména z pohledu materiálových alternací, ze kterých budou tyto desky vyrobeny. Dále můžeme na modelu vidět statorové těleso složené ze somaloyových jader a cívek na nich navinutých. Společně s rotory a permanentními magnety tvoří celek magnetického obvodu motoru. Stator s cívkami je od okolních částí oddělen kompozitním tělem, ve kterém proudí olejová náplň pro chlazení cívek. Rotorové desky jsou přichyceny přímo k výstupní hřídeli, která je uložena za pomoci ložisek v ložiskových deskách.

2.3 Aktuální trendy eliminace ztrát v elektropohonech

Jak jsme mohli na Obr. 8 sledovat, nejnižší zastoupení zde mají mechanické ztráty s přibližně 18 %, dále vinutí s 44% a nakonec ztráty v magnetickém obvodu s hodnotou 38%. Tyto složky ztrát motoru je možné potlačovat aplikací nových technologií či vyspělými materiály. Níže okrajově uvedu aktuální trendy ve zvyšování účinnosti točivých strojů ve vztahu ke zmíněným třem složkám ztrát. Možnosti použití těchto prostředků, jako v každém odvětví techniky, je přímo navázáno na množství vynaložených prostředků vzhledem k dosaženým výsledkům. Proto se velmi často stává, že moderní přístupy jsou použitelné pouze při vědecké praxi nebo v extrémních aplikacích. Proto se zde zaměřím na možné přístupy, ale dále v práci se omezíme pouze na řešení eliminace magnetických ztrát v ložiskových deskách stroje.

2.3.1 Mechanické ztráty

Mocnost mechanických ztrát roste s otáčkami, jak uvádí (Clifford, a další, 2013) udávaná hodnota v této práci odpovídá 1500 ot/min motoru se jmenovitým výkonem 30kW. To jsou přibližně otáčky blízké našemu vývojovému axiálnímu motoru pro řešení problematiky. Kdybychom zkoumali rozložení ztrát u vysokootáčkového stroje, řekněme při 50 000 ot/min mechanické ztráty by dosahovaly hodnot blízkým 50% veškerých ztrát, jak uvádí (Clifford, a další, 2013). Tyto ztráty jsou generovány ložisky, případně třením vzduchu a rotoru v rotorovém prostoru. Ztráty vířením vzduchu můžeme s přihlédnutím k nízkým maximálním otáčkám testovaného motoru na úrovni 2000 ot/min zanedbat. Za ložiska s nejnižším valivým odporem se považují magnetická, jak uvádí ve své práci (Gerhard Schweitzer, 2009), ty vzhledem k povaze silových poměrů, které přenáší v axiálním motoru, lze použít. Nicméně magnetická ložiska se používají u rotačních vysokootáčkových strojů, kde dochází k vysokým mechanickým ztrátám. Další nevýhodou těchto ložisek je, že musí být instalováno zvlášť ložisko pro radiální složku síly a zvlášť pro axiální. Díky tomu jsou tato ložiska konstrukčně složitá, velice objemná a mimo funkčních částí musí být řízena řídicí jednotkou a napájena aktivním zesilovačem. (Gerhard Schweitzer, 2009) Další možná varianta je tedy kuličkové ložisko se svým relativně nízkým valivým odporem a schopností přenášet vysoké silové zatížení jak v radiálním, tak axiálním směru.

Pro popis silových poměrů v motoru uvádím na Obr. 10 silový rozbor možných namáhání ložiskových desek v axiálním směru, přenášejících kuličkovými ložisky.



Obr. 10 Silový rozbor zatížení ložiskové desky v axiálním motoru.

Na obrázku jsou zavedeny možné působící síly, jedná se především o síly přítažné, které generují permanentní magnety při nevyrovnané velikosti vzduchové mezery. Do výsledné síly je nutné zahrnout také sílu vnější z homokinetických kloubů hnacích kol. Ta vzniká při současném přenosu momentu mezi motorem a hnacím kolem automobilu a pro-pružení nebo naopak odlehčení z rovnovážné polohy. Přesnou hodnotu této vnější síly lze velice obtížně definovat, protože závisí na několika vnějších faktorech.

2.3.2 Ztráty ve vinutí motoru

Největší zastoupení ztrát v motoru má vinutí, zde je na vině skin effect (Mattis, 1958), jev blízkosti (Satapathy, 2014) a vířivé proudy (Adewale, 2013). Tyto ztráty je těžké eliminovat, jelikož samotný vodič zprostředkovává přenos hybné energie pro fungování stroje. Jediným způsobem, jak tyto ztráty snížit na minimum, je využít supravodivosti některých materiálů, například HTS (High temperature superconductor) (W.J.Carr, 2001)

Tyto materiály jsou založené na bázi Samaria, Ytria a Gadolinia a označují se jako supravodiče II. typu. Cívky statoru je možné navinout z něj. Následně je nutné splnit druhou podmínku, a to podchlazení kapalným dusíkem pod hranici -137°C . Tedy velice náročná operace. I přesto se tyto



motory vyrábějí, většinou pro speciální použití, příkladem je využití pro letadlové lodě amerického námořnictva s výkony v řádech desítek MW. Doporučené použití supravodičů vzhledem k náročnosti a ceně výroby stroje je od 3MW výkonu výše. (Elektro, 2010) Z práce pana (SCHÖNBAUER, 2011) vyplývá, že pro aplikace do 100kW výkonu tato materiálová úprava není vhodná.

2.3.3 Ztráty v magnetickém obvodu

Ztráty v magnetickém obvodu motoru tvoří druhou největší část ztrát a to je také náš bod zájmu, zde můžeme ztráty ovlivnit použitými materiály a tvarem součástí. Jak už jsem zmínil v úvodu této práce, mezi hlavní výhody synchronního motoru s axiálním magnetickým tokem a permanentními magnety ze vzácných zemin je především malý rozměr a váha. Tvarovou optimalizací ložiskových desek, které jsou předmětem našeho zájmu, bychom výraznou eliminaci vířivých proudů v deskách nedocílili bez rapidního zvýšení zástavného objemu stroje a jeho hmotnosti. Proto se pokusíme teoretickou a experimentální cestou nalézt materiál s vlastnostmi, které zaručí vysokou pevnost, dobrou teplotní vodivost a minimalizaci tvorby vířivých proudů.

2.4 Kvalifikace ztrát v magnetickém obvodu motoru

Ztráty, tvořené vířivými proudy v konstrukčním materiálu motoru, jsou značně závislé na tvarovém provedení a na vlastnostech použitých materiálů.

V magnetickém obvodu stroje dochází při střídavé magnetizaci feromagnetik ke ztrátám přeměnou elektrické energie na magnetickou a naopak. Tyto magnetické ztráty, také označované jako ztráty v železe, se skládají ze ztrát vířivými proudy a ztrát hysterezních.

Celkové magnetické ztráty můžeme vypočítat prostým součtem těchto složek v rovnici (2.1). (M.F. de Campos, 2006).

$$P_c = P_v + P_h + P_p \quad (2.1)$$

Kde P_c jsou celkové ztráty, P_v jsou ztráty vířivými proudy, P_h ztráty hysterezní a P_p ztráty přídatné.

Ztráty vířivými proudy můžeme definovat dle rovnice (2.2). (Novák, 2012)

$$P_v = \frac{4}{3} d^2 B^2 f^2 \frac{V}{\rho} \quad (2.2)$$

Kde d je tloušťka materiálu, B magnetická indukce, f je frekvence, V je objem materiálu a ρ je měrný elektrický odpor.

Ztráty hysterezní můžeme definovat jako (2.3). (B. Heller, 1961)

$$P_h = f S_s V \quad (2.3)$$

Kde f je frekvence, S_s je plocha hysterezní smyčky a V je objem materiálu.

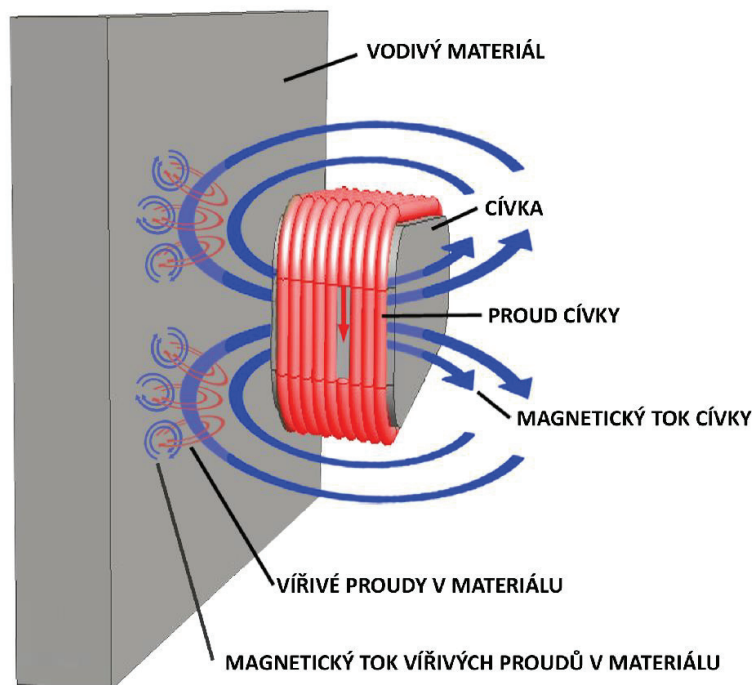
Přídavné ztráty jsou obvykle vířivého charakteru a jsou způsobovány rozptylovými toky prostorových harmonických složek, nerovnoměrnostmi ve vzduchové mezeře a pulzací toku. Definovat přídavné ztráty je proto mnohem složitější, ale obecně můžeme napsat (2.4). (B. Heller, 1961)

$$P_p = P_c - P_v - P_h \quad (2.4)$$

2.4.1 Ztráty vířivými proudy

Změna polohy vodiče v magnetickém poli v materiálu tohoto vodiče indukuje elektrické napětí. Toto napětí vytváří ve vodiči elementární indukované proudy ve formě drobných vírů, uzavřených kolem magnetického toku v materiálu. Také mohou být nazývány podle svého objevitele Léona Foucaulta, tedy Foucaultovy proudy. Vířivé proudy jsou proudy indukované a podle Lenzova zákona se snaží zabránit změně, která je vyvolala. Proto se ve vodiči (ložiskové desce), umístěném v magnetickém poli (statoru), indukuje elektrický proud a má takový směr, že svým magnetickým polem působí proti změně magnetického indukčního toku, která je jeho příčinou.

V následujícím Obr. 11 si můžeme popsat tento stav, kdy magnetický tok cívky, uzavírající se kolem závitů, prostupuje okolním prostorem až do vodivého materiálu. V něm tento magnetický tok generuje proud elektronů, uzavírající se kolem magnetického toku. Proud hledá cestu nejmenšího odporu, proto elektrony proudí v těsné blízkosti magnetického toku. Čím je cívka, která vytváří magnetickou indukci, dál od materiálu, tím menší je intenzita magnetického pole a kolem magnetického toku se uzavírá menší proud elektronů. Se vzdáleností tedy vliv vířivých proudů slábne.

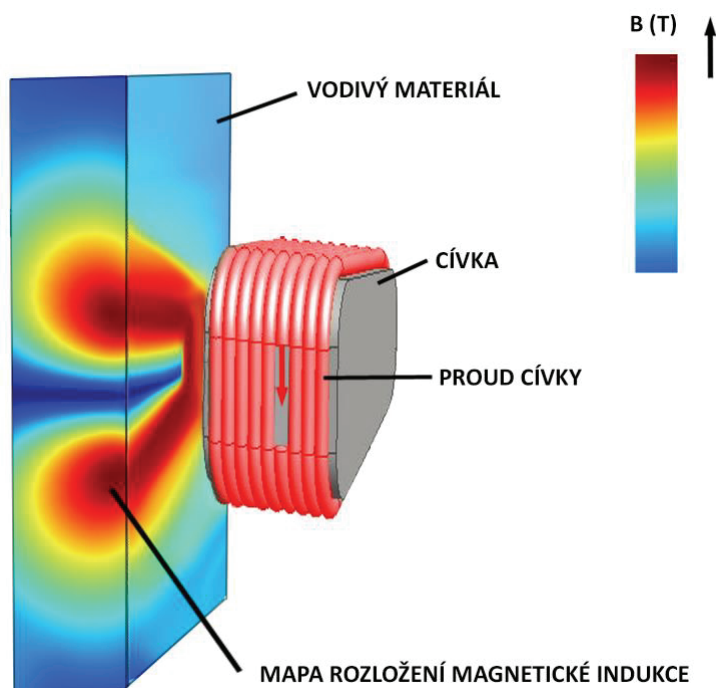


Obr. 11 Popis vířivých proudů ve vodivém materiálu

Důvod, proč dochází ke ztrátám v materiálu při tvorbě vířivých proudů, je na Obr. 11 také znázorněn. Jak popisuje již zmíněné Lenzovo pravidlo, „elektrický proud má takový směr, že svým magnetickým polem působí proti změně magnetického indukčního toku, který je jeho příčinou“, vířivé proudy v materiálu vytváří také, stejně jako proud v cívkě, magnetický indukční tok a ten má opačnou orientaci k magnetickému indukčnímu toku generovaného cívkou. Tyto navzájem reverzní toky se odečítají. To je také patrné z Faradayova zákona elektromagnetické indukce znaménkem mínus v rovnici (2.5). (Macek, 2011)

$$\varepsilon_F(t) = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.5)$$

Kde je ε_F indukované elektromotorické napětí, Φ znamená celkový magnetický tok protékající obvodem, t je čas. Na Obr. 12 můžeme sledovat rozložení magnetické indukce ve vodivém materiálu v blízkosti cívky, připojené ke zdroji proudu. Je patrné, že největší intenzita je na hranici obvodu průřezu cívky, kde se uzavírá magnetický tok. Tyto nejintenzivnější oblasti jsou také nejvíce zahřívány ztrátovým teplem, vygenerovaným vířivými proudy.

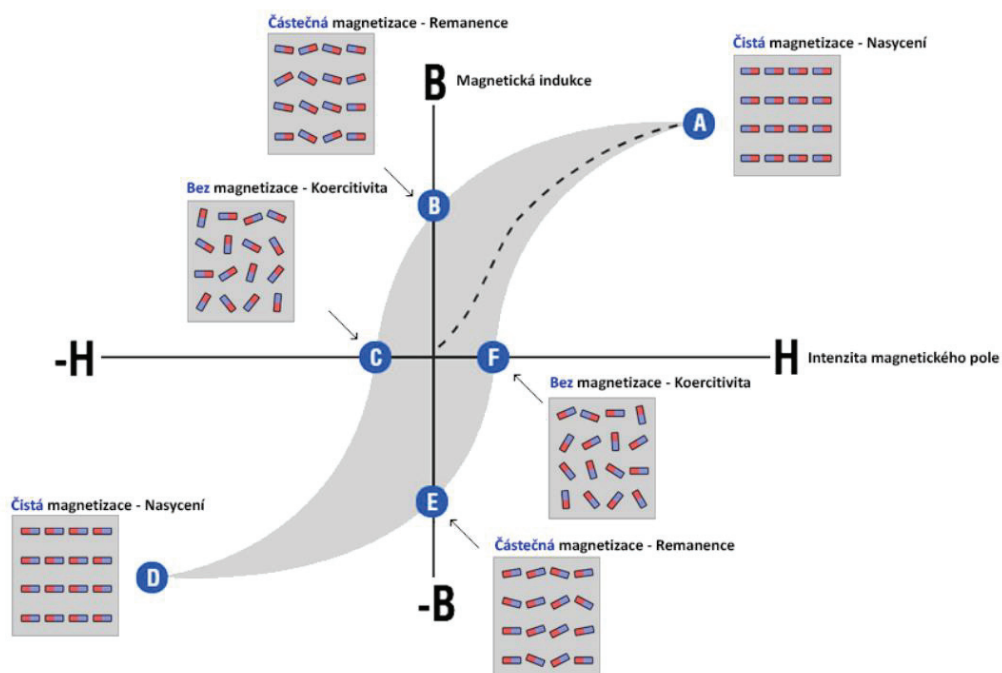


Obr. 12 Mapa rozložení magnetické indukce v materiálu v blízkosti cívky

Z výše uvedeného vyplývá, že velikost vířivých proudů je přímo úměrná elektrické vodivosti materiálu. Jak už bylo uvedeno v rovnici (2.2) **čím vyšší je měrný odpor materiálu, tím jsou nižší ztráty**. V dobře vodivém materiálu dochází ke ztrátovému oteplování indukci snadněji než v materiálu s nízkou vodivostí. Je to proto, že vlivem vířivých proudů dochází k dalšímu ztrátovému mechanismu. Feromagnetické materiály jsou cyklicky magnetizovány a demagnetizovány vlivem změny magnetického pole statoru. To způsobí, že magnetické domény mění svou orientaci, což vede k hysterezním ztrátám. Ty mají za následek další ztrátové teplo. (COMSOL, 2016)

2.4.2 Ztráty hysterezní

Jsou přímo úměrné ploše hysterezní smyčky a jejich velikost závisí na velikosti magnetické indukce a intenzitě magnetického pole. Tedy čím větší je plocha smyčky, tím vyšší jsou hysterezní ztráty, tedy energie potřebná k přemagnetování, k posunu Blochových stěn a změně orientace magnetických domén (HAJKO, 1982). Hysterezní smyčka se skládá z křivky prvotní magnetizace na Obr. 13 označená čárkovaně. Šedou barvou a body A až F je pak znázorněna uzavřená cyklická hysterezní smyčka. Body A až F ukazují, jak se chovají magnetické domény během magnetizace smyčky.



Obr. 13 Hysterezní smyčka

Je to graf podávající informaci o tom, jaký vliv má působení vnějšího magnetického pole na magnetické schopnosti materiálu, který se v tomto poli nachází. Magnetická indukce je funkcí intenzity magnetického pole a permeability.

$$B = \mu H \quad (2.6)$$

Kde μ je permeabilita a H intenzita magnetického pole.

Tedy můžeme tvrdit, že **čím vyšší je permeabilita, tím nižší je také plocha smyčky a tím nižší jsou hysterezní ztráty v materiálu**. Permeabilita je tedy materiálovou konstantou a stěžejní materiálovou veličinou pro redukci hysterezních ztrát. Je tedy zřejmé, že potřebujeme materiál s permeabilitou co možná nevyšší.

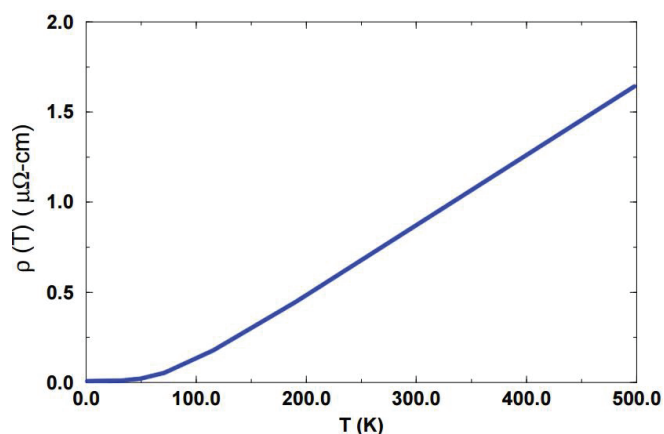
2.5 Faktory ovlivňující magnetické ztráty v materiálu

Ke změnám elektrické vodivosti dochází působením několika činitelů. Mohou to být změny teploty, změny tlaku, chemické složení či změna struktury a tepelně-mechanického zpracování materiálu. Níže uvádím několik typů veličin nebo zdokumentovaných stavů, majících vliv na dvě hlavní, výše uvedené veličiny, tedy rezistivitu (také nazývanou jako měrný elektrický odpor) a permeabilitu. Ty považujeme za hlavní ukazatele velikosti ztrát. Obě tyto veličiny rostou na úkor ztrát a ovlivňují je níže popsány stavy.

2.5.1 Vlivy teploty

Obecně je známa závislost elektrické vodivosti běžných kovových materiálů, která klesá s narůstající teplotou. To mají za následek kmity krystalové mřížky. Při snižování teploty dochází ke zmenšování kmitů mřížky a ty tak méně narušují průchod elektronů, tedy se zvyšuje vodivost. Při velmi nízké teplotě u některých materiálů dojde až k supravodivosti, ta vzniká při teplotách pod T_C (Curieova teplota). Závislost odporu kovů a některých prvků na teplotě není v nízkých teplotách lineární, ale od teploty T_D (Debyeova teplota) výše, se závislost mění v lineární. To uvádí ve své práci například (C.L. Kane, 2008), z grafu uvedeného v práci, viz Obr. 14, lze vysledovat zmíněnou linearitu nad hranicí blízké 100K. Závislost vodivosti materiálu na teplotě je tedy různá, ale na základě současných

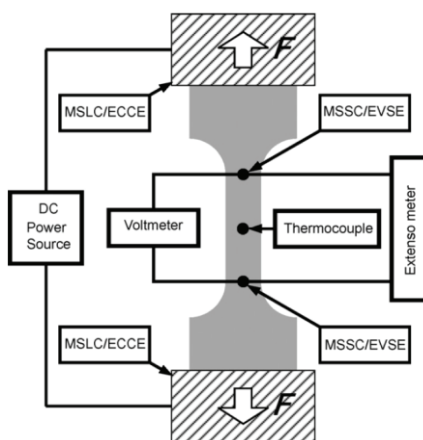
poznatků můžeme tvrdit, že nad teploty blízké 100K odpor roste lineárně a to je také rozsah teplot, ve kterých by se měl zamýšlený axiální motor pohybovat. Pro naše účely tedy můžeme tvrdit, že rezistivita použitého materiálu pro ložiskové desky motoru bude lineárně narůstat s teplotou.



Obr. 14 Změna rezistivity kovů s teplotou (C.L. Kane, 2008)

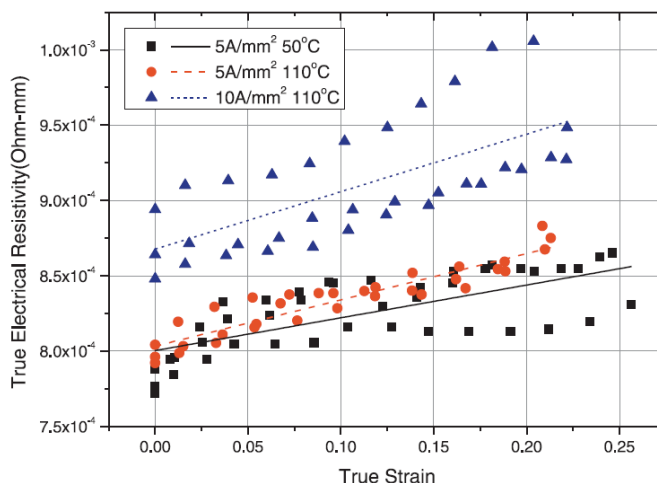
2.5.2 Vliv napětí v materiálu

Aplikace mechanického napětí na krystalickou mřížku materiálu má mnoho důsledků, které ovlivňují výslednou rezistivitu materiálu. V práci (Jianming Mai, 2011) je publikován vliv mechanického napětí na měrný elektrický odpor. V trhačím stroji byl upnut vzorek, který byl osazen měřením odporu, teploty a prodloužení.



Obr. 15 Schematické zapojení experimentálního měření (Jianming Mai, 2011)

Na Obr. 15 je schematicky znázorněno zapojení experimentálního měření s jednotlivými prvky měřící soustavy. Zkušební vzorky definovaného rozměru byly vloženy do trhacího zařízení a na zúžené tělo vzorku aplikovány měřící sondy voltmetru, extenzometru a termočládku. Výstupy z tohoto měření jsou vyobrazeny v grafech na následujících obrázcích.

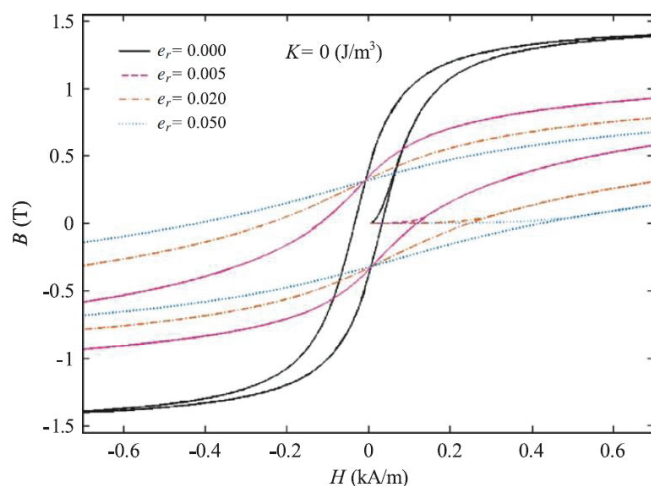


Obr. 16 Rezistivita v závislosti na prodloužení u nerezové austenitické oceli (Jianming Mai, 2011)

Z naměřených dat tohoto experimentu jsou vyhotoveny grafy na Obr. 16. Z těchto výsledků vyplývá, že se zvyšujícím se napětím v tahu, roste také elektrický měrný odpor materiálu. Nárůst měrného odporu je v (Jianming Mai, 2011) zdůvodňován nárůstem hustoty dislokací. Ztráty v tomto materiálu se tedy budou snižovat s nárůstem napětí v tahu.

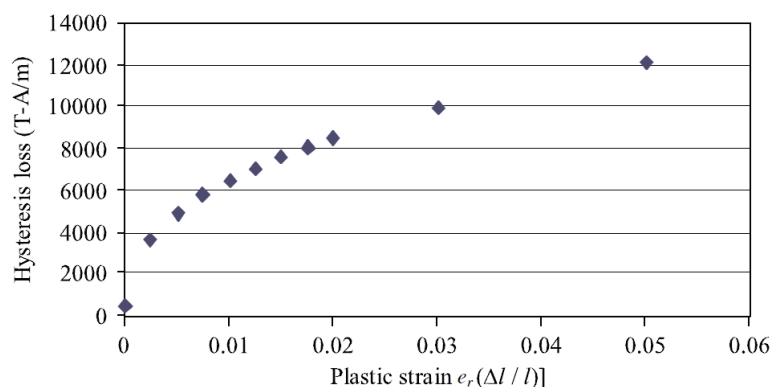
V publikacích (C. Y. LIU, 2011) a (Liu Chengye, 2013) je popsán postup modelování hysterezních smyček pro vzorky s tahovou plastickou deformací.

Na Obr. 17 jsou pak vypočteny hysterezní smyčky touto metodou pro různé stupně deformace.



Obr. 17 Vypočtené hysterezní smyčky pro různé deformity 0%, 0,5%, 2% a 5%. (M.J. Sablik, 2006)

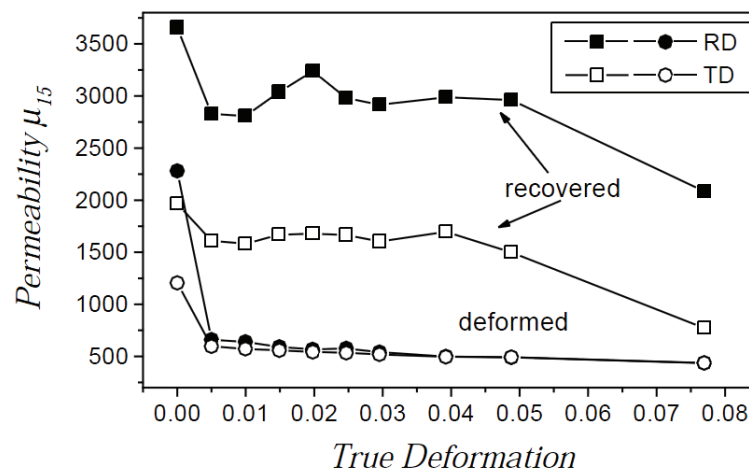
Z modelovaných hysterezních smyček můžeme soudit také jejich obsah, který je úměrný, jak bylo popsáno v předchozí kapitole, hysterezním ztrátám. Je patrné, že s velikostí deformace rostou hodnoty intenzity magnetického pole a permeability materiálu klesá. Tyto práce tedy potvrzují, že s narůstající deformací rostou také magnetické ztráty, podobně jak bylo popsáno v předchozích odstavcích. Graficky čitelnější je graf na Obr. 18, který přímo znázorňuje závislost hysterezních ztrát jako funkci plastické deformace.



Obr. 18 Vypočítaná ztráta hystereze v závislosti na plastické deformaci. (M.J. Sablik, 2006)

Zajímavou prací je také (F.J.G. Landgraf, 2002), výstupy z měření permeability v závislosti na deformaci viz Obr. 19. Zde pozorujeme kolísavou, ale snižující se tendenci permeability s nárůstem

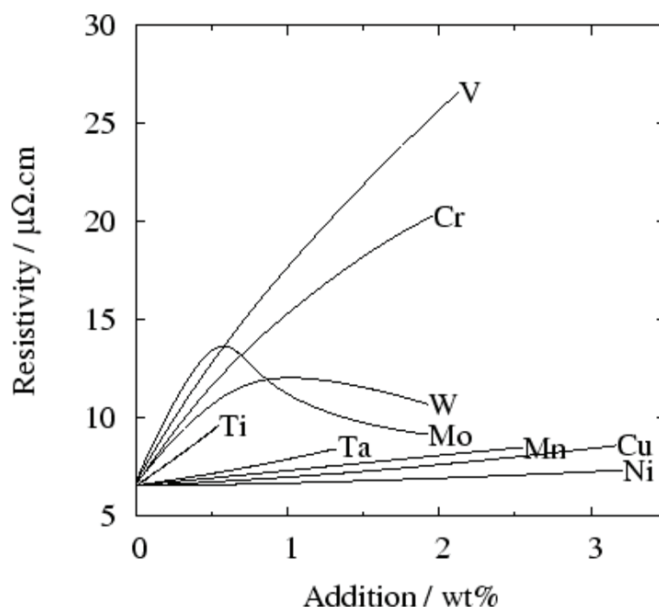
deformací. Žíhané vzorky vykazují mnohem vyšší hodnoty permeability. Válcováním deformované vzorky naopak nižší permeabilitu. Důležitým poznatkem je pak dvojnásobný rozdíl hodnoty permeability ve směru válcování po žíhacím procesu nežli v příčném směru. Zde je patrný výrazný vliv válcování na permeabilitu, potažmo potencionální magnetické ztráty. Z výsledků této práce vyplývá poznatek, že i když jsou mechanické vlastnosti ovlivňovány zejména dislokacemi a magnetické vlastnosti jsou ovlivňovány pohybem doménových stěn, obě tyto funkce navzájem souvisejí a vykazují různé vlastnosti.



Obr. 19 Permeabilita v závislosti na deformaci pro deformované a žíhané vzorky ve válcovaném (RD) a příčném (TD) směru (F.J.G. Landgraf, 2002)

2.5.3 Vliv chemického složení

Vliv chemického složení na rezistivitu, zastupující v tomto rozboru magnetické ztráty, je zcela zásadní. Jsou to právě chemické prvky a jejich roztoky, které rozhodují o základní podobě vodivosti. Pokud se podíváme například na jeden z nejlépe vodivých materiálů jako je Cu, s rostoucím obsahem různých legujících prvků se snižuje její elektrická vodivost. Je to proto, že tyto příměsi, nečistoty způsobují rozptýl proudících elektronů. Elektrické pole je jiné u legujícího prvku a jiné u základního atomu. Je tedy velice důležité znát složení materiálu ve vztahu k jeho vodivosti. Na Obr. 14 uvádím graf znázorňující vliv legujícího prvku na výslednou rezistivitu materiálu.

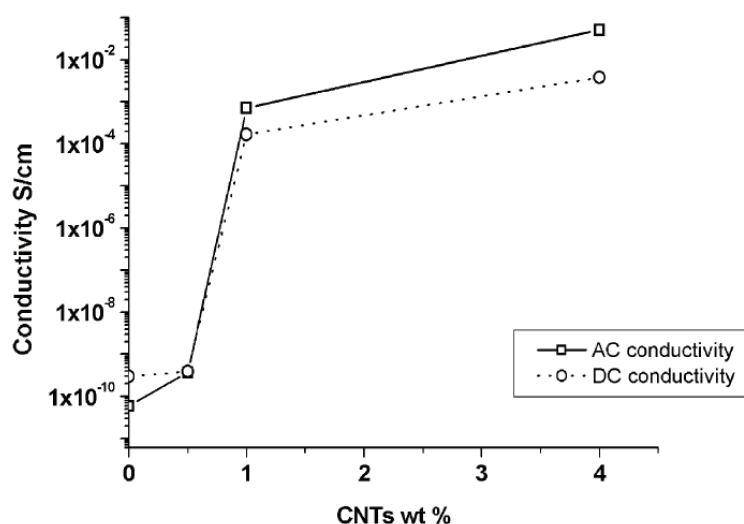


Obr. 20 Vliv obsahu přísad na odpor slitiny železa a kobaltu (Chen., 1977)

Kromě wolframu a molybdenu s množstvím prvku v této slitině narůstá rezistivita a tím se také snižují potencionální magnetické ztráty v materiálu. Z této práce také vyplývá, že nejlépe zvyšuje rezistivitu této slitiny vanadium, bohužel vedlejším produktem této příměsi je zvýšená tažnost, které je pro naši aplikaci nechtěná.

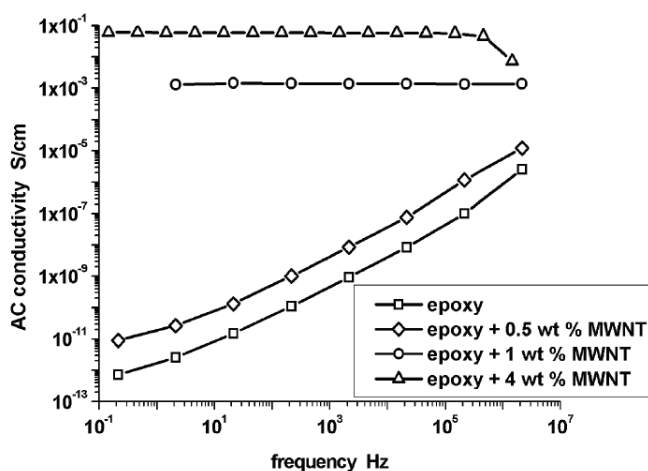
Pokud bychom zamýšleli materiál naopak s velmi nízkou tažností a relativně vysokou pevností, mohli bychom zamýšlet výrobu ložiskových desek z nějakého typu kompozitových materiálů. V dnešní době za nejrozšířenější typ konstrukčních kompozitů můžeme jistě považovat karbonový kompozit. Ten díky obsahu uhlíku také vykazuje jistou vodivost, velice nízké průrazné napětí a nízkou elektrickou pevnost, tuto problematiku jsem s kolegy popisoval dříve ve své práci (Radim Čech, 2012).

U karbonových kompozitů je právě obsah uhlíku nepřímo úměrný rezistivitě. To uvádí ve své práci (A. Allaoui, 2002), který popisuje měření stejnosměrné a střídavé vodivosti ve vztahu k hmotnostnímu podílu karbonových nanotrubic v kompozitu. Toto je možné sledovat na Obr. 21. Se zvyšujícím se obsahem uhlíku se zvyšuje vodivost, snižuje rezistivita a rostou magnetické ztráty v materiálu.



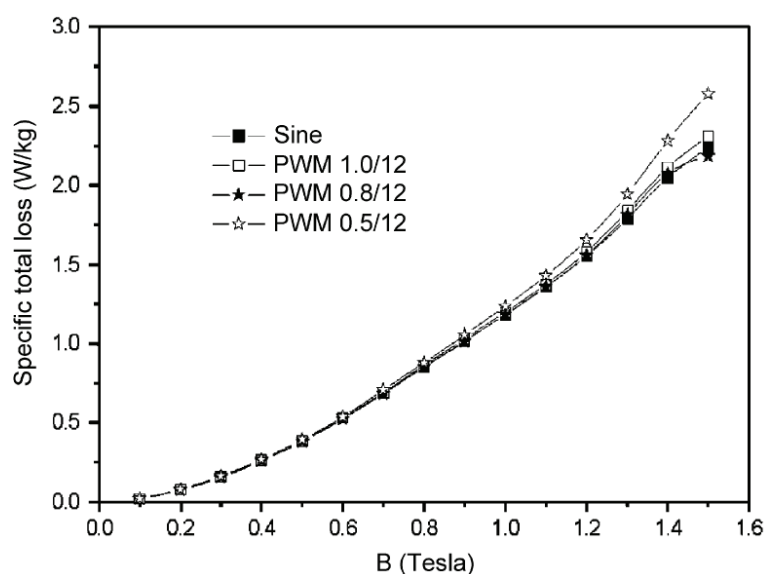
Obr. 21 Vodivost v závislosti na hmotnostním podílu CNT (karbonové nanotrubic) pro 100Hz. (A. Allaoui, 2002)

Svou práci ještě doplnil o měření v grafu na Obr. 22, popisující chování vodivosti s narůstající frekvencí. Zde se ukazuje, že epoxid bez nebo s obsahem do jednoho procenta uhlíku s frekvencí vodivost podporuje. Nad jedno procento uhlíku se vodivost chová konstantně, čtyřprocentní koncentrace uhlíkových víceštěnných nanotrubic při vysokých frekvencích vykazuje opačný snižující se trend.



Obr. 22 Vodivost v závislosti na frek. a hmot. podílu MWNT (více štěnná nanotrubic). (A. Allaoui, 2002)

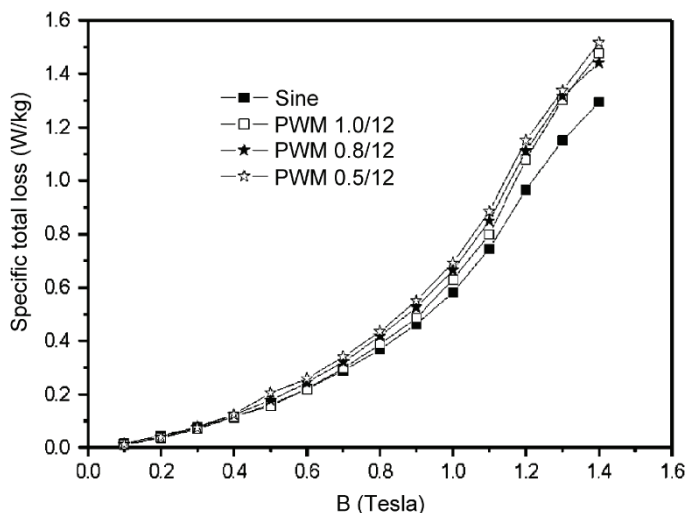
Nyní se zaměříme na nejrozšířenější slitiny oceli v elektrotechnice, a to křemíkové oceli. V práci (J. Leichta, 2008) uvidíme, že ztráty v materiálu s narůstajícím syčením magnetickou indukci zvyšují také produkci magnetických ztrát. To má za následek, jak jsme již uváděli, permeabilita materiálu. Magnetická indukce je funkcí intenzity magnetického pole a právě zmíněné permeability. Tyto ztráty rostou s magnetickou indukci až do plného nasycení materiálu. Na Obr. 23 je vyobrazen graf závislosti celkových ztrát na magnetické indukci pro ocel s příměsí 5,5% křemíku. Graf odpovídá zkoušce s nosnou frekvencí proudového zdroje 50 Hz a PWM regulací. Průběhy křivek mají vzestupný exponenciální trend až do hranice 1,4 T, kde lze vnímat změnu trendu a snižování nárůstu vlivem nasycení materiálu. Lze předpokládat, že při vyšší magnetické indukci se budou křivky ustalovat do svých konstantních hodnot.



Obr. 23 Závislost celkových ztrát na magnetické indukci při frek. 50Hz pro ocel s 5,5% Si. (J. Leichta, 2008)

Příměs křemíku v oceli se již od padesátých let minulého století využívá jako prostředek ke snižování tvorby hysterezních ztrát u střídavě napájených elektrozařízení a strojů. Na Obr. 24 je stejná závislost jako v předchozím grafu pouze s tím rozdílem, že obsah křemíku v měřeném materiálu byl 6,5%. Tento jednaprocentní nárůst má při porovnání grafů výrazný vliv na celkové magnetické ztráty v materiálu, jak z pohledu snížení ztrát o nejméně 30%, tak v průběhu nárůstu ztrát.

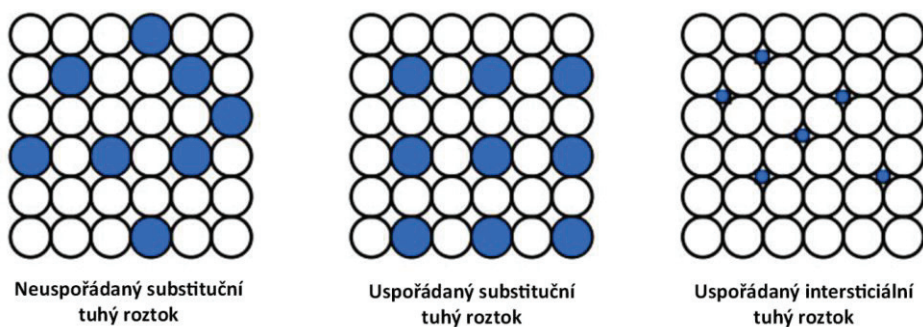
Nárůst ztrát u oceli s 6,5% křemíku pomaleji roste a již zmíněný exponenciální nárůst je razantnější.



Obr. 24 Závislost celkových ztrát na magnetické indukci při frek. 50Hz pro ocel s 6,5% Si. (J. Leichta, 2008)

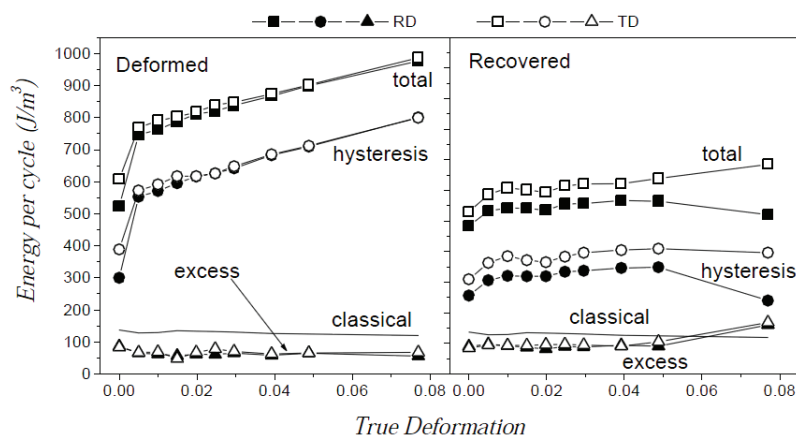
2.5.4 Vliv struktury

Vodivost materiálu se snižuje s rostoucí mírou neuspořádanosti struktury. Neuspořádaný stav krystalické struktury vzniká při rychlém ochlazování z nadkritické teploty tzv. kalení. Vznikají deformace mřížky, které snižují vodivost materiálu. Naopak zahřátím na žíhací teplotu, setrváním a poté pozvolným ochlazováním, tzv. normalizačním žíháním, vodivost materiálu zvyšujeme. Jedná se o difuzní proces. Na Obr. 25 jsou schematicky znázorněny různé tuhé roztoky s neuspořádanou a uspořádanou strukturou.



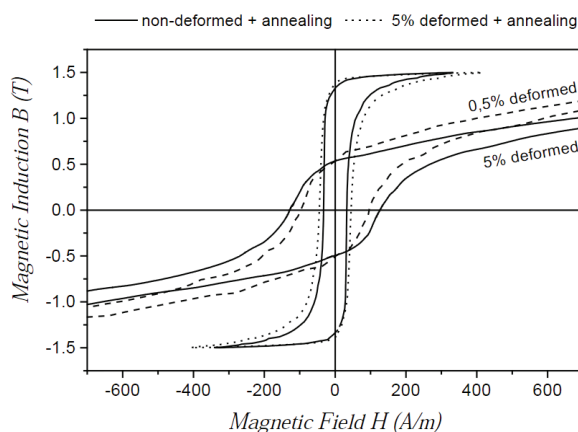
Obr. 25 Příklady uspořádané a neuspořádané krystalické struktury

Z grafu Obr. 26 je možné odvodit vliv válcování a žíhacího procesu na permeabilitu. Žíhané vzorky vykazují mnohem nižší hodnoty celkových ztrát. Je zřejmé, že po žíhacím procesu se hysterezní ztráty značně snížily a s tím také celkové ztráty.



Obr. 26 Ztráty v deformovaných vzorcích před a po žíhání v závislosti na množství deformace, měřeno ve směru válcování a příčném (F.J.G. Landgraf, 2002)

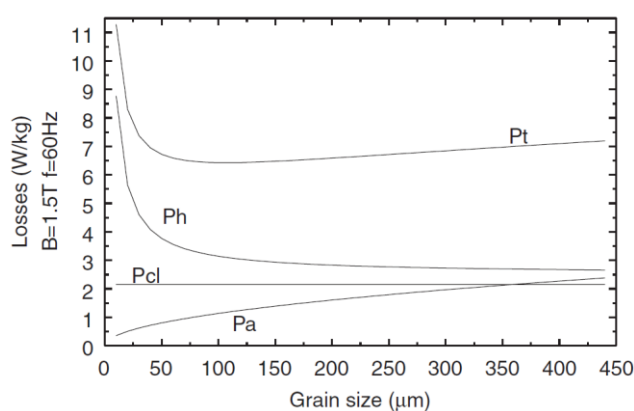
V kapitole 2.5.2 jsem se zmínil o vlivu plastické deformace na hysterezní ztráty. Vztah mezi magnetickou indukcí a intenzitou magnetického pole udává permeabilita. Můžeme si ale všimnout na Obr. 27, že permeabilita se mění s tvarovou deformací. Dokonce podle (F.J.G. Landgraf, 2002) stačí velice drobná deformace materiálu, která má výrazný vliv na omezení magnetické indukce a snížení permeability materiálu.



Obr. 27 Hysterezní smyčky vzorků nedeformovaných, def. a žíhaných po deformaci. (F.J.G. Landgraf, 2002)

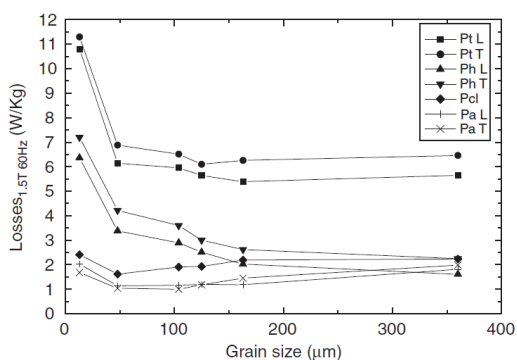
2.5.5 Vliv velikosti zrn

Jak již bylo uvedeno v kap. 2.4, celkové magnetické ztráty jsou složeny ze ztrát hysterezních, ztrát vířivými proudy a přídavných ztrát. Na Obr. 28 jsou patrné průběhy jednotlivých složek ztrát v závislosti na velikosti zrna materiálu. Ztráty vířivými proudy jsou na změnu velikosti zrna inertní a s velikostí zrna zůstávají konstantní. Hysterezní ztráty prudce klesají až do velikosti zrna 150 μm , kdy se křivka ustálí a s dalším zvětšováním zrna se již nemění. Opačný trend mají ztráty přídavné, které s velikostí zrna narůstají a dle tvaru křivky lze předpokládat jejich ustálení za hodnotou 500 μm .



Obr. 28 Vliv velikosti zrna na ztráty Pt (Pc), Ph, Pa(Pp) a PCL(Pv). Příčném směru (M.F. de Campos, 2006)

Vliv velikosti zrna v materiálu na vodivost, potažmo na vzniklé ztráty v materiálu, je rozsáhlá problematika. Z Obr. 29 je zřejmé, jaký vliv má velikost zrna na výsledné ztráty. Zde je zajímavé sledovat průběh hysterezních ztrát, které s velikostí zrn nad 100 μm slábnou a ztráty vířivými proudy, které naopak lehce rostou, výsledkem jsou relativně ustálené hodnoty celkových ztrát s narůstající velikostí zrn.



Obr. 29 Vliv velikosti zrna na Pt, pH, PA, a PC, v příčném (T) a podélném (L) směru. (M.F. de Campos, 2006)

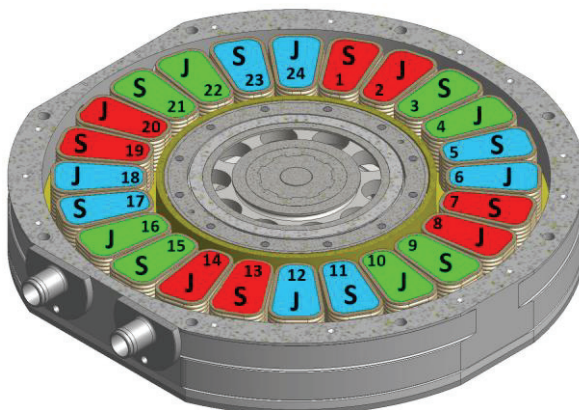
2.6 Popis axiálního motoru

V elektrickém točivém stroji vzniká za pomoci konstrukce, zapojení a buzení elektromagnetické točivé pole, které unáší rotor s hřídelí, na které při zátěži vzniká kroutící moment. Toto točivé pole bohužel působí i na další konstrukční části motoru, které jsou z pohledu stroje statické a znehodnocují část příkonu v odpadní teplo. Jednou z těchto částí jsou nosné konstrukční díly motoru, v našem konkrétním případě ložiskové desky uzavírající a oddělující rotorové části motoru od okolního prostředí. Na tyto části je kladeno hned několik důležitých požadavků. Je to teplotní vodivost, která přímo navazuje na nechtěnou elektrickou vodivost, pevnost a teplotní stálost. Tato víka vytvářejí nežádoucí brzdny moment motoru. Právě tento brzdny moment je jev, který budeme sledovat a popisovat ve vztahu k možným použitým materiálům ložiskových desek.

Brzdny moment vzniká na základě pronikající magnetické indukce ze jha motoru do okolního prostředí. Indukční pole zasahující do ložiskových desek vytvoří v materiálu proud elektronů a ten je v materiálu uzavřen, nazýváme je vířivými proudy. Proud elektronů tedy v ložiskových deskách koná práci a projevuje se oteplením materiálu. Tato tepelná energie je ztrátovou energií motoru a snižuje účinnost motoru a jeho výkonové parametry.

Pokud se podíváme detailně na Obr. 9, uvidíme řez motorem a popis jednotlivých částí motoru pro zavedení čtenáře do problematiky stroje. Magnetický obvod axiálního motoru s dvojitým rotorem se skládá z dvojitého rotoru a těla statoru, magnetický tok se uzavírá přes dvojitou vzduchovou mezeru, která je obvykle malá, do 2 mm. Rotor je zhotoven z magneticky vodivého materiálu. Na čele rotoru jsou připevněny permanentní magnety, které mají obvykle tvar kruhové výseče. Postupně po obvodu rotoru se polarita magnetů mění, dokud není dosaženo potřebného počtu pólů. Vnější rotor na druhé straně je ze stejného materiálu a magnety na něm jsou pootočený o pólou rozteč, tedy aby se po přiblížení obou rotorů k sobě magnetické pole uzavíralo přes somaloyová jádra statoru. Z pohledu tloušťky, čím je rotor tenčí, dochází na vnější straně k většímu rozptylu magnetického pole a zasahuje více do ložiskových desek. Z hlediska mechanického namáhání musí mít rotor také potřebnou mechanickou pevnost a tuhost, protože tah magnetů (axiální přitažlivá síla) dosahuje obrovských hodnot a axiální síla tahu permanentních magnetů by mohla způsobit jeho deformaci.

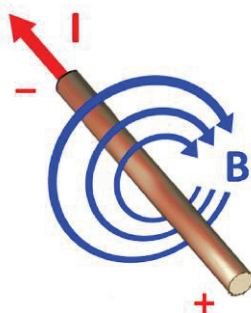
Dohromady je v celém statoru uloženo 24 cívek, 12 pól párů, tedy 3 fázové skupiny po čtyřech pól párech. Schematicky je to patrné z Obr. 30.



Obr. 30 Schéma rozložení cívek statoru

Pokud je uzavřen budící okruh navinutých cívek, začne proud elektronů téci materiálem vodiče a to vyvolá magnetické pole o intenzitě v závislosti na materiálu, v němž se nachází. Obecně je výskyt tohoto pole znám jako siločáry magnetů. Tyto jinak neviditelné čáry jsou hladiny, ve kterých jsou vyrovnány potenciály pole, a proto se tyto drobné piliny kovu v tomto prostoru natočí do směru své magnetizace a uskupí do tvaru siločar. Každá siločára kolem vodiče je uzavřená.

Magnetická indukce kopíruje smysl siločar. Podle pravidla pravé ruky, palec vodorovně s vodičem ukazuje směr proudu a ostatní prsty obtočené kolem vodiče ukazují směr magnetické indukce.

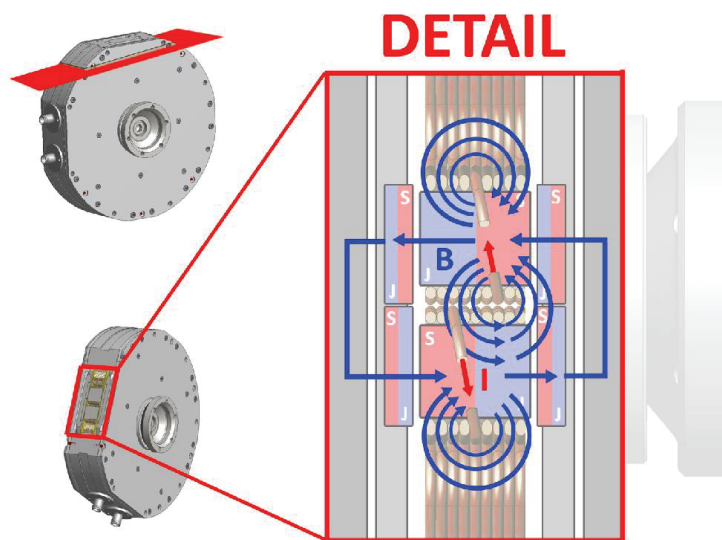


Obr. 31 Směr a orientace proudu a magnetické indukce vodiče.

Pro zpřesnění uvádím Obr. 31. Na základě tohoto jevu se při navinutí vodiče do cívky a zapojení elektrického obvodu vytvoří indukční tok cívkou a vytvoří se tím elektromagnet s orientací pólů dle

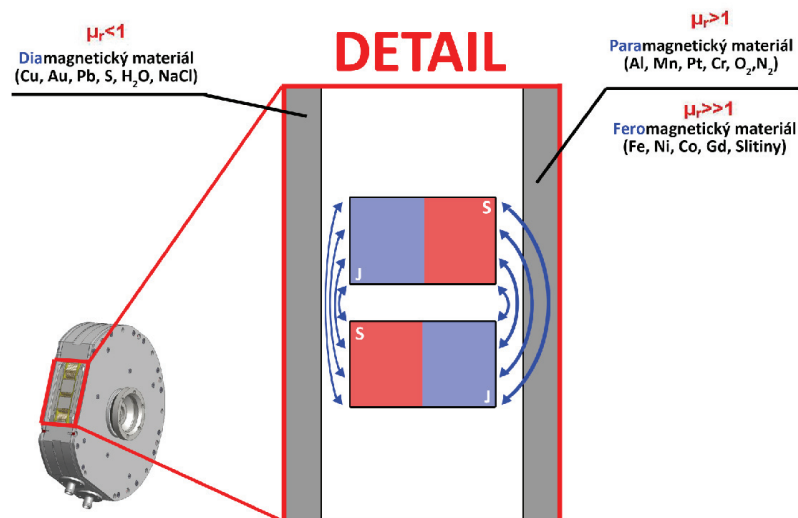
průchodu proudu. Na Obr. 32 můžete vidět jak z pól páru, tvořeného dvěma cívkami, zapojenými s opačnou polaritou, vznikne magnetický obvod, vytvářející magneto-motorickou sílu, potřebnou pro pohyb rotoru s permanentními magnety. Na základě rozptylu magnetického toku za rotorem ložiskovými deskami část magnetického obvodu prochází také, a to je nežádoucí jev. Můžeme zde sledovat zjednodušený schematický popis toků magnetické indukce jhem motoru a okolními částmi v jednom pól páru.

Na obrázku můžeme vidět jeden cívkový pár, tento cívkový pár spolu s dalšími třemi cívkovými páry tvoří jednu fázovou skupinu.



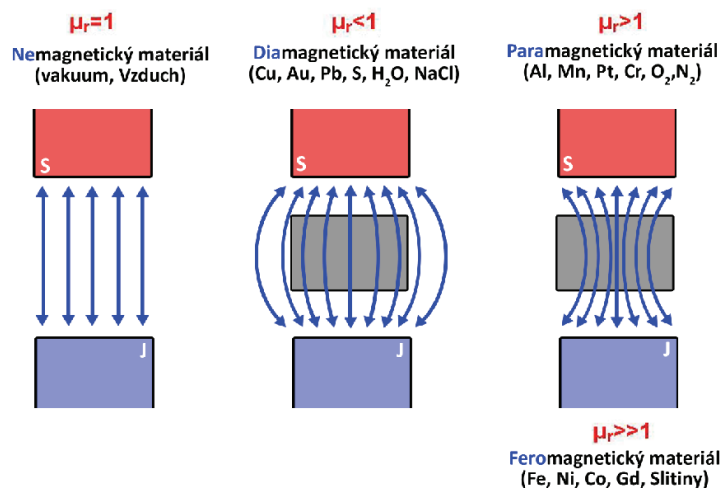
Obr. 32 Schematický popis indukčního toku jhem motoru a ložiskovými deskami

Pokud se na tento magnetický obvod zadíváme detailněji, můžeme si zde popsat vznik silových vazeb mezi jednotlivými částmi obvodu. Pokud si toto schéma ještě zjednodušíme pouze na jednoduchý magnetický obvod, a to stav, kdy obvodem prochází maximální indukce, tzn. všechny póly v obvodu jsou nejbližší samy sobě, můžeme zanedbat vzduchovou mezeru a považovat sblížené magnety za jeden celek, tvořící jednoduchý magnetický obvod viz Obr. 33.



Obr. 33 Zjednodušený magnetický obvod pól páru ve jhu motoru

Zde chci také naznačit, jakým způsobem mohou indukční siločáry pomyslně procházet přes ložiskové desky motoru v závislosti na použitém materiálu desek a tím ovlivňovat ztráty vířivými proudy, indukovanými v deskách. Na Obr. 34 je znázorněn smysl a průběh indukce mezi dvěma póly magnetu s různými druhy materiálů, vloženými do magnetického obvodu.



Obr. 34 Vliv materiálu na magnetický indukční tok

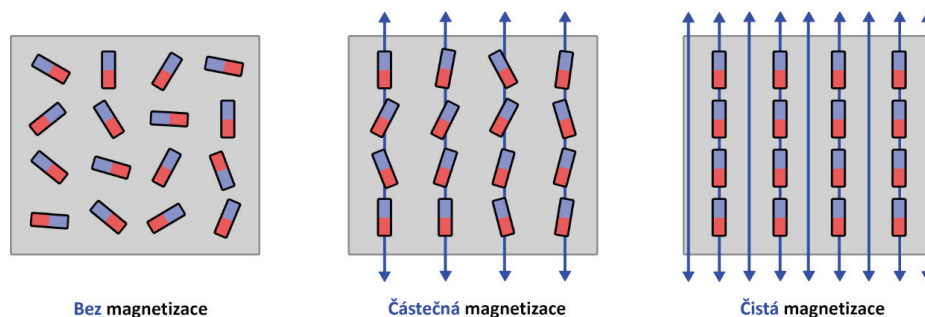
Známe několik druhů materiálů, které je možné rozdělit podle magnetických vlastností. K rozdělení těchto látek nám slouží relativní permeabilita. Rozděluje nás látky na nemagnetické, diamagnetické, paramagnetické a feromagnetické (ferimagnetické, antiferomagnetické). Jak je vidět z Obr. 34, nemagnetické látky v magnetickém obvodu nevyvolávají na magnetickou indukci ani intenzitu

magnetického pole žádnou reakci. Tyto materiály jsou například vzduch nebo vakuum (permeabilita vakua je $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H / m}$).

Diamagnetické materiály v magnetickém obvodu siločáry spíše vytlačují od těchto látek, za diamagnetické látky považujeme například měď Cu s relativní permeabilitou $\mu_r < 1$.

Paramagnetické materiály naopak zhušťují tok indukce magnetického obvodu látkou a podporují tedy vedení magnetického toku. Tyto materiály se chovají indukčně pouze za přítomnosti pole, kdy se jejich magnetické domény, res. Weissovy domény, orientují do směru magnetizace a podpoří tak magnetický tok. Nedokážou udržet magnetismus bez přítomnosti vnějšího pole. Bez něj jsou domény náhodně orientované na základě teplotních kmitů mřížky a celkový magnetický moment je tedy nulový. Typickým příkladem tohoto materiálu je hliník Al s relativní permeabilitou $\mu_r > 1$.

Feromagnetické materiály s relativní permeabilitou $\mu_r \gg 1$ nejlépe vedou magnetizaci. Mohou se vyskytovat s různými typy spontánní magnetizace, může v nich existovat více než jeden magnetický iont na základní buňku materiálu.



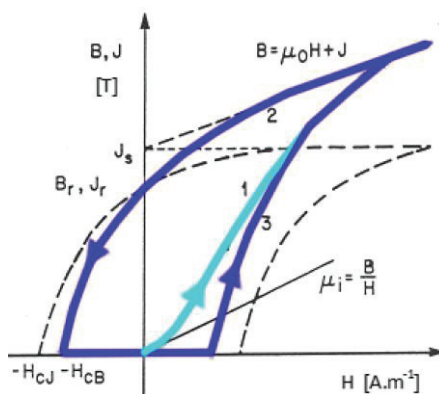
Obr. 35 Schematický popis orientování magnetických domén v materiálu (HAJKO, 1982)

Čistě feromagnetický materiál je pouze ten, ve kterém všechny magnetické ionty zprostředkují kladný přírůstek k plné a čisté magnetizaci. Na Obr. 35 je znázorněn schematický popis orientování jednotlivých materiálových domén ve vztahu k vnějšímu magnetickému poli. V normálním demagnetizovaném stavu je magnetizace magnetických materiálů nulová. Velikost domén bývá 10^{-1} až 10^{-4} mm. Domény jsou odděleny stěnami o tloušťce okolo 5 až 100 nm. Pokud toho nejsou v plném rozsahu schopny, tedy i za přítomnosti pole jsou některé magnetické dipóly v doménách anizotropicky orientovány, nazýváme je ferimagnetické látky. Pokud jsou v přítomnosti pole domény orientovány proti magnetizaci pole, nazýváme je antiferomagnetiky, viz Obr. 36.



Obr. 36 Příklady možných uspořádání magnetických momentů

Domény vymezují oblasti, ve kterých jsou uspořádány magnetické momenty. Směry momentů se mění od jedné domény k druhé. Domény jsou natáčeny do shodného směru. V každé z domén jsou magnetické momenty orientovány ve směru minimální energie anizotropie. Nejvýznamnější parametry energie anizotropie jsou magnetická anizotropie (řízena symetrií krystalické mřížky, magnetostrikční anizotropie) tato vzniká jako odezva na působící napětí, tvarová anizotropie (souvisí s geometrií vzorku). (MAZANEC, 1983) (WADA, 2010)



Obr. 37 Hysterezní smyčka (Luedtke, 2001)

Na Obr. 37 je patrná odezva výchozího demagnetizovaného materiálu na působící magnetické pole. Je-li aplikováno malé pole (H), pak domény orientované těsně do směru tohoto pole rostou na úkor jiných za realizace reverzního pohybu doménových stěn při malé magnetické indukci B . V případě malých polí je permeabilita $\mu = B/H$. Nazývá se počáteční permeabilitou a je významnou magnetickou charakteristikou (např. při magnetickém stínění). V případě vyššího magnetického pole se stává pohyb domén nevratným, když se tyto uvolní z uchycení např. u inkluze nebo u hranice zrna. Indukce pak rychle vzrůstá a permeabilita dosahuje maxima (má význam např. z hlediska materiálových požadavků energetických transformátorů). V dané situaci každé zrna sestává v podstatě z jedné domény, jejíž magnetizace je usměrněna podle snadné osy, která má směr nejbližší H . (MAZANEC, 1983)

3 Východiska pro vlastní výzkum

Na Katedře materiálů a technologií pro automobily probíhá výzkum a vývoj v oblasti elektromobility viz grantové projekty v kap. 11.3. Výstupem řešení několika grantových projektů byly technicky aplikovatelné výsledky, především v podobě funkčních vzorků, dále pak technické zprávy a publikace. Část výzkumně vývojových aktivit je zaměřena na vývoj pohonných jednotek. V průběhu testování a měření byl pozorován vliv magnetických ztrát na trakční moment motorů, tento jev byl také provázen oteplením.

Tato práce svou teoretickou částí popisuje mechanismy tvorby magnetických ztrát a poukazuje na vlastnosti a provázání materiálových konstant a parametrů, které ztráty ovlivňují ve vazbě na konstrukci axiálního motoru. Magnetické ztráty vznikají především těmito mechanismy:

- **Vířivé proudy** jako nedílná složka magnetických ztrát ovlivňuje hodnota **rezistivity** (měrný elektrický odpor).
- **Hysterezní ztráty**, jako druhá neoddělitelná složka magnetických ztrát, ovlivňuje **permeabilita** materiálu.

Velikost magnetických ztrát ovlivňují materiálové vlastnosti, dalším důležitým faktorem jsou okrajové podmínky vycházející z geometrie a rozměrů dané konstrukční součásti. Mimo těchto základních veličin bylo nutné, aby zkoumané materiály podléhaly dalším specifickým parametrům. Jedním z těchto parametrů je **pevnost materiálu**, aby byla zachována funkce pro danou konstrukční část. Druhý parametr je pak **teplotní vodivost** k odvodu odpadního tepla z objemu motoru.

Pro realizaci materiálového výzkumu bude navržen a vyroben experimentální axiální motor, aby testovací zařízení, umožňující výměnu ložiskových desek vyrobených z různých materiálů. Výzkum proběhne na třech typech materiálů.



Body vlastního výzkumu:

- ***Návrh materiálů pro ložiskové desky***
- ***Kontrola fyzikálních vlastností navržených materiálů***
 - *Mechanické zkoušky.*
 - *Zdokumentování strukturních vlastností.*
 - *Stanovení chemického složení.*
 - *Stanovení elektrických a magnetických vlastností.*
- ***Návrh a stavba vývojového axiálního motoru***
 - *Návrh.*
 - *Výroba.*
 - *Stavba.*
 - *Výpočty.*
 - *Simulace.*
 - *Výrobní postupy.*
 - *Volba polotovarů.*
 - *Technická dokumentace.*
- ***Ověření zvolených materiálů měřením výkonových parametrů***
 - *Oteplení ložiskových desek*
 - *Teploty vinutí motoru*
 - *Účinnost motoru*
 - *Krouticí moment*
- ***Ověření motoru v provozu elektromobilu***
 - *Zkouška oteplení*
 - *Dynamické testy*

4 Experimentální plán

V Tabulka 1 jsou uvedeny parametry experimentů, které jsou důležité pro ověření dané oblasti problematiky. Tyto parametry byly určeny na základě shrnutí současného stavu uvedeného této práci. Dále jsou v tabulce uvedeny funkční proměnné, které budou měřeny, zaznamenány a následně vyhodnoceny.

Tabulka 1 Sledované parametry ve vztahu k funkčním proměnnými

Funkční hodnoty - sledované parametry	Funkční proměnné - parametry experimentů					
	Otáčky motoru	Příkon motoru	Zátěž brzdy	X2CrNi 18-9	AlCu4PbMg Mn	EP GC 201
Průběh oteplení ložiskových desek	Pracovní bod			Materiál ložiskových desek		
Průběh teploty vinutí statoru motoru						
Průběh teploty vinutí rotoru motoru						
Průběh účinnosti vývojového motoru						
Průběh kroutícího momentu vývojového motoru						
Ověření v reálném provozu	Městský provoz					
	Kombinovaný provoz					
	Dálniční provoz					
	Maximální rychlost					
	Akcelerační zrychlení					
	Rekuperační brzdění					



5 Cíle disertační práce

- *Modelování, návrh a stavba experimentálního axiálního motoru.*
- *Ověření vlivu různých typů materiálu na ztrátový výkon motorů na motorové brzdě.*
- *Aplikační ověření vybrané varianty axiálního motoru v provozu elektromobilu.*
- *Shrnout naměřené poznatky a vytvořit tak znalostní východisko pro navazující aplikační vývoj.*

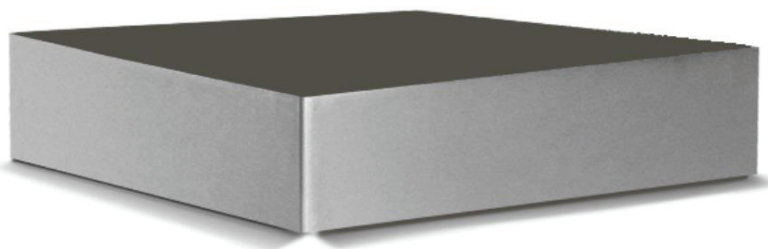
6 Příprava experimentu

6.1 Návrh materiálů pro ložiskové desky

Materiál pro výrobu ložiskových desek volím ze tří různých konstrukčních materiálů rozdílného charakteru. Pokud se podíváme na nejpoužívanější konstrukční materiály v automobilovém průmyslu, najdeme zde zástupce hliníkových slitin, pevnostních ocelí a kompozitů. Z tohoto důvodu bych chtěl navrhnout zástupce pro každou tuto oblast. Materiály musí být voleny s ohledem na výše zmíněnou rezistivitu, permeabilitu, pevnost a teplotní vodivost. Jako poslední omezující vlastnost materiálu je třeba uvést obrobitelnost. Jedná se o prototypovou a kusovou výrobu, ložiskové desky z tohoto důvodu budou všechny shodně obrobeny 5-osým obráběcím centrem. Tím bude zaručena jistá přesnost a tím také porovnatelnost jednotlivých typů.

6.1.1 Volba hliníkové slitiny pro ložiskové desky

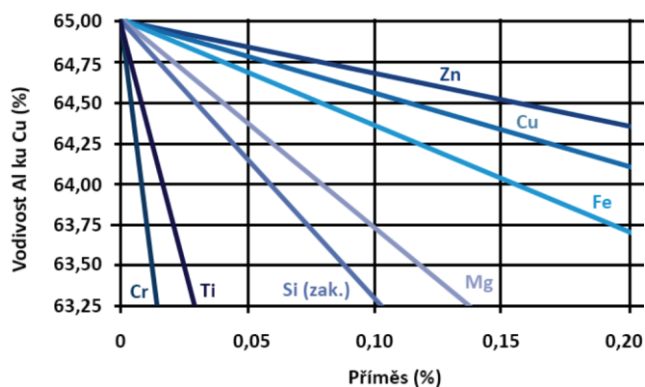
Hliník je nejrozšířenějším kovem na planetě. Tvoří skoro 8% zemské kůry. Má nízkou hustotu, a proto se hojně využívá v aplikacích, kde je třeba snižovat hmotnost. To znamená od kosmonautiky přes vojenskou techniku a letectví až po automobily. Významné místo zaujímá v elektronickém průmyslu. Ve velké míře se využívá na chladiče elektrických součástek či strojů a vyrábí se v nejširším možném množství druhů provedení (Obr. 38). Mezi výhody hliníku patří jeho hmotnost (třikrát lehčí než ocel) a dobrá korozivzdornost. Nevýhodou se v řadě aplikací může jevit nízká pevnost.



Obr. 38 Hliníkový blok pro obrábění

Hliník extrahujeme převážně z bauxitů chemickou rafinací za vzniku asi 70% Al_2O_3 . Tím lze dosáhnout obsahu křemíku do 0,3% a dosáhnout rezistivity kolem $28 \cdot 10^{-9} \Omega \text{m}$. Hliník má nízkou hustotu na úrovni $2660 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ podle stupně tváření.

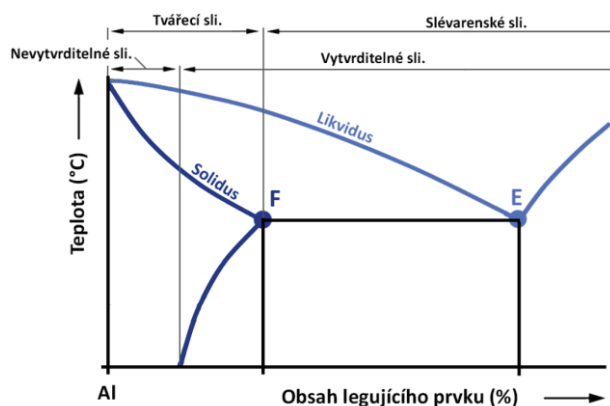
Nízká pevnost hliníku lze zvýšit legováním (mědí, manganem, zinkem, sírou) a nebo mikro legováním (berylliem). Legováním se snižuje elektrická vodivost viz Obr. 39 a také chemická odolnost.



Obr. 39 Vliv legujících prvků na elektrickou vodivost hliníku ve vztahu k vodivosti Cu. (Jaromír Drápala, 2012)

Slitiny hliníku s dalšími kovy jsou často pevné a lehké, díky tomu mají široké použití. Při styku s jinými kovy dochází v přítomnosti vlhkosti k elektrolytické korozi. Základními typy slévarenských slitin jsou Al-Si-Mg, Al-Si, Al-Mg, Al-Cu, Al-Si-Cu, Al-Zn-Mg, Al-Zn, Al-Cu-Mg-Pb. Slitiny v oblasti nižších koncentrací jsou eutektického typu, tvorba substitučního tuhého roztoku alfa hliníku doprovází zvýšení meze pevnosti. Rozpustnost legujícího prvku klesá s teplotou. Slitiny pro tváření jsou za vyšších teplot tvořeny homogenním tuhým roztokem, za nižší teploty se v důsledku změny rozpustnosti objevuje ve struktuře další fáze vzniklé segregací, viz Obr. 40.

Slévarenské slitiny s vyšším obsahem legur, jsou heterogenní, ve struktuře se objevuje eutektikum, slitiny mají zvýšený obsah eutektika a nižší tvářitelnost, mají dobré slévarenské vlastnosti s vysokou zabíhavostí.



Obr. 40 Binární diagram Al a legur (LAŠTOVICA, 2012)

Nejpoužívanější slitiny hliníku:

- **Slitina silumin** - nejrozšířenější slitina hliníku s křemíkem, určená pro odlévání. Obsahuje kolem 12 hm. % Si, někdy se přidává malé množství Cu (1 %).
- **Slitiny hliník a nikl** - používají se hlavně pro zvýšené teploty v polykomponentních systémech. Ni (obsahy do 2,5 %) v některých slitinách zvyšuje mechanické vlastnosti za normálních a zvýšených teplot, zlepšuje odolnost proti korozi.
- **Slitiny hliník a zinek** - mají výbornou pevnost, menší houževnatost, nižší korozní odolnost, lepší tvárnost za zvýšených teplot.
- **Slitiny hliník a hořčík** - Mg je v malém množství téměř ve všech slitinách Al, zlepšuje podmínky pro tepelné zpracování, zlepšuje odolnost proti korozi. Obsah hořčíku pro tváření je do 8 %, slitiny pro slévání do 11 %.
- **Slitina duralumin (dural)** – tepelně vytvrditelná hliníková slitina typu Al-Cu-Mg s obsahem asi 4 % Cu a 0,6 % Mg. Ve vytvrzeném stavu má pevnost v tahu $R_m = 200$ až 550 MPa. Používá se k výrobě tvářených polotovarů. S příměsí Pb je vhodná pro obrábění, nevznikají velké třísky. Slitina s vyšším obsahem hořčíku má vyšší pevnost. Dodává se zpravidla ve vytvrzeném stavu ve formě plechu, trubek, drátů nebo různě tvarovaných profilů. Dural je lehký (měrná hmotnost 2,800 kg.dm⁻³), je dostatečně pevný a snadno se obrábí.
- **Slitina Aldrey** – hliníková slitina využívaná pro elektrotechnické účely. Skládá se z Al, 0,5 % Si a 0,5 % Mg. Při dobré el. vodivosti má zhruba dvakrát větší pevnost než čistý hliník. Tepelným zpracováním a tvářením za studena lze pevnost v tahu zvětšit až na 300 MPa.
- **Slitina Condal** - skládá se z hliníku, 0,4 % Mg a 0,4 % Fe. Je vhodná pro vinutí transformátorů, elektrických točivých strojů a všude tam, kde samotný hliník svými mechanickými vlastnostmi nestačí.

Z výše popsaných materiálů se jako nejvhodnější slitina jeví, s přihlédnutím k požadavkům, jedna ze slitin s vyšší pevností. Pro náš účel potřebujeme určit slitinu hliníku, vhodnou k aplikaci na ložisková víka motoru. Základním parametrem je pevnost, protože se jedná o konstrukční části motoru a hliníkové slitiny mají nejnižší pevnost z navrhovaných zástupců (ocel, hliník, kompozit) při shodných rozměrech. Dle grafu na Obr. 39 by slitina měla obsahovat některé z uvedených legujících prvků, zvyšující rezistivitu, jako je např. síra nebo hořčík. Také musíme přihlížet na možnosti obrobitelnosti, která je u hliníkových slitin relativně obtížnější. S ohledem na tyto požadavky volím slitinu hliníku a mědi, všeobecně označovanou jako duralumin (dural), konkrétně slitinu AlCu4PbMgMn s doplňkovými legujícími prvky jako je hořčík (snižující vodivost) a olovo (zvyšující obrobitelnost). Svou pevností, rezistivitou, tepelnou vodivostí a obrobitelností by měl nejvíce vyhovovat, z výše uvedených slitin, pro ložiskové desky axiálního motoru.

6.1.2 Volba oceli pro ložiskové desky

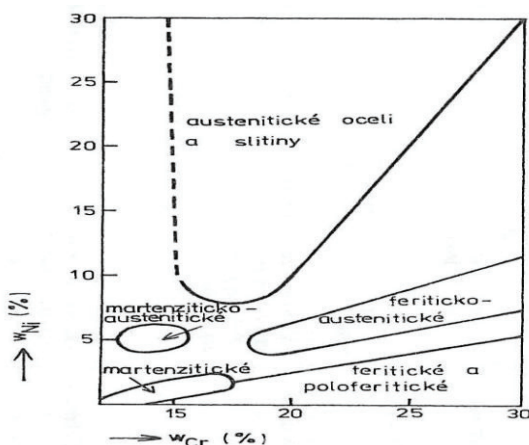
Při volbě slitiny oceli musíme zohlednit magnetismus materiálu. Magnetický materiál je pro ložiskové desky zcela nevhodný, a proto musíme hledat ocelový materiál nemagnetický. Zde se nabízí korozivzdorné austenitické oceli. Jsou nemagnetické, případně pouze se zbytkovou magnetizací, způsobenou zbytkovým martenzitem. Nerezová ocel je obecný název pro všechny druhy oceli, které nepodléhají korozi, neboli jinými slovy, ty druhy oceli, které jsou odolné oxidaci. Jejich standardizace je vyjádřena v různých mezinárodních normách. Tento typ oceli nepotřebuje speciální druh povrchové úpravy. Je zde tak zvaná pasivní vrstva na povrchu, která se neustále obnovuje a zabraňuje korozi. Ocel je odolná oxidaci díky vlastnostem, které jsou dány příměsí prvku, jako jsou chrom, nikl nebo molybden.



Obr. 41 Korozivzdorný blok oceli pro výrobu

Korozivzdorné oceli (Obr. 42) jsou všeobecně rozdělovány podle jejich chemického složení a struktury do několika základních skupin, a to na martenzitické (magnetické), feritické (magnetické) a austenitické (nemagnetické) s některými přechodovými skupinami.

Podle chemického složení jsou to oceli chromové, chromniklové a chrommanganové, které mohou obsahovat ještě další slitinové prvky, jako molybden, křemík, měď, titan, niob, dusík apod.



Obr. 42 Vyznačení oblasti chemických složení různých typů korozivzdorných ocelí (MACH, 2008)

Nejpoužívanější slitiny korozivzdorných ocelí:

- **Martenzitické korozivzdorné oceli** - jsou kaleny za teploty rozpouštěcího žhání okolo 1 000 °C, což vede k fázové přeměně z austenitické struktury na martenzitickou strukturu. Kalitelné chromové oceli jsou magnetické a mohou být tepelně zpracovány do vysoké pevnosti v závislosti na obsahu uhlíku, chromu (12 až 20 %) a dalších slitinových prvků. Korozní odolnost těchto ocelí je nízká v porovnání s austenitickými oceli. Velmi rozšířená je ocel obsahující 0,15 % C, 12 % Cr bez niklu (ČSN 17 021). 2 až 4 % přísady niklu dovolují zvýšit obsah chromu až na 18 %, aniž by se ve struktuře objevil ferit, a dosáhnout tak velmi příznivého kompromisu mezi mechanickými vlastnostmi a korozní odolností. (Číhal, 1999) (MACH, 2008)
- **Feritické korozivzdorné oceli** - v nízkouhlíkových slitinách je existence Fe–Cr austenitické fáze omezená cca 12 % chromu. Od této koncentrace jsou všechny slitiny feritické v celém rozmezí teplot až do bodu tavení. Ve feritických korozivzdorných ocelích je 12 až 30 % chromu a nízký obsah uhlíku. Vyšší obsah chromu zvyšuje jejich korozní odolnost, která v oxidačních prostředích je vyšší než u kalitelných martenzitických ocelí a u některých typů dosahuje při legování molybdenem odolnosti austenitických ocelí. Mají prostorově středěnou mřížku, jsou magnetické a dostatečně tažné. (Číhal, 1999).
- **Austenitické korozivzdorné oceli** - obsahují chrom jako jediný slitinový prvek ve větším množství. Přísada niklu, manganu, popř. dusíku, ke slitinám železa s chromem ve vhodně vyváženém množství vytváří základ dalšího typu ocelí, zvaných austenitické, protože si udržují austenitickou

strukturu za normální teploty i za velmi nízkých minusových teplot. Nepřítomnost fázových přeměn činí tyto oceli citlivými k růstu zrna za vysokých teplot, jako je tomu u feritických ocelí, bez možné regenerace tepelným zpracováním. Základní člen řady těchto ocelí dnes obsahuje 18 % chrómu a 9 % niklu při obsahu uhlíku kolem 0,08 % (ČSN 17 240).

- **Austeniticko-feritické oceli** - jsou odvozeny od klasických austenitických ocelí zvýšením obsahu chrómu a snížením obsahu niklu; nové rovnovážné složení tak vede k přítomnosti určitého podílu feritu ve struktuře. Tato skupina ocelí má tři významné výhody jako jsou lepší mechanické vlastnosti než u austenitických ocelí, pozoruhodná odolnost proti mezikrystalové korozi a proti koroznímu praskání, lité součásti ocelí jsou bez trhlin. Podíl feritu v dané oceli se mění v závislosti na tepelném zpracování. (Číhal, 1999)

Pro náš záměr, jak bylo výše již mnohokrát zmíněno, je nutné zvolit nemagnetický materiál, s vysokou pevností, vysokou rezistivitou, dobrou tepelnou vodivostí a vhodnou obrobiteľnosťou pro použití na ložiskové desky axiálního motoru. Volím chromniklovou austenitickou korozivzdornou ocel X2CrNi18-9. Dle Obr. 42 a popisu výše by hladina chromu měla být kolem 18% a niklu kolem 9%. Jedná se o nemagnetickou ocel s vysokou pevností a dobrou teplotní vodivostí. Vhodnými obráběcími postupy navíc nedochází ke změnám vlastností.

6.1.3 Volba kompozitu pro ložiskové desky

Jde o pevnou látku, složenou nejméně ze dvou fází. V celku je dosahováno vlastností, kterých jednotlivé složky nedosahují a nedají se dosáhnout ani jejich sumací, tzv. synergický efekt. Skládají se z matrice (spojitá fáze) a disperze (nespojité fáze). V průmyslu je využíváno mnoho druhů kompozitových materiálů, níže uvádím rozdělení dle nejčastějších používaných matic:

- **Skelná vlákna** - Jsou amorfní a vyrábějí se tažením z taveniny. Tato vlákna mají průměr nejčastěji od 4 do 20 μm . Skelná vlákna mají lepší houževnatost než uhlíková vlákna. Sklo je odolné proti ohni a mnoha chemikáliím, má poměrně vysokou pevnost v tahu a nízký modul pružnosti. Odolnost proti otěru je nízká. Průměrná hmotnost je asi 2500 kg/m³. Vyznačuje se elektro a tepelně izolačními vlastnostmi. Ze skelných vláken se také zhotovují mnohá elektrická zařízení. Pevnost v tahu je až 500 MPa. (Vnouček, 2010)
- **Uhlíková vlákna** - Jsou krystalická, mají vysokou pevnost, modul pružnosti, tepelnou odolnost a vysokou únavovou pevnost současně s nízkou měrnou hmotností. Jsou elektricky vodivá. Nevýhodou je nízká odolnost proti nárazu a elektrochemická koroze při kontaktu s méně ušlechtilými kovy. Uhlíkové vlákno je nejvíce používané k vyztužení kompozitních materiálů, zvláště u materiálu známého jako uhlíkový laminát. Tento druh materiálu se používá při výrobě částí letadel, závodních vozidel, sportovního vybavení jako jsou závodní kola, listy větrných generátorů a dalších součástí. (Grégr, 2004)
- **Aramidová vlákna** - Jsou to vlákna z lineárních makromolekul, v jejichž řetězcích se opakují funkční amidové skupiny (Karbonylová skupina). Dalším stupněm vývoje jsou para-aramidy vyráběné pod značkou Kevlar nebo Twaron. Tato vlákna dosahují mimořádně vysokou pevnost v tahu při nízké specifické hmotnosti. Používají se hlavně ve vojenském průmyslu a zdravotní technice. (EHRENSTEIN, 2009)
- **Wiskeryová vlákna** – Vlákna jsou vyráběna od průměru 1 mikronu s délkou do 25 mm. Jejich nejrozsáhlejší použití je v hliníkových slitinách pro zvýšení pevnosti a únavových vlastností. Kompozit je vysoce vodivý. Z důvodů své mikroskopické velikosti se usazují v plicích a nejsou odbouratelné, jejich použití je tedy omezeno pro aplikace s nákladnými ochrannými opatřeními. (H.Q. Yan, 2003)

V tomto krátkém rozdělení připadají v úvahu pouze nevodivé kompozity s dielektrickými vlastnostmi, jako je sklotextit ze skelných vláken nebo kevlar z aramidových vláken bez často přidávaných uhlíkových vláken. Pokud porovnáme tyto materiály s ohledem na použití pro ložiskové desky,

narazíme na dvě nevýhody Kevlaru. První, že není vhodný do vlhkého prostředí a druhý že není vhodný k namáhání tlakem, jak uvádí (EHRENSTEIN, 2009). Obě tyto okolnosti u axiálního motoru mohou nastat, proto s ohledem na tyto nevýhody volím materiál na bázi skelných vláken, který je k těmto okolnostem rezistentní.

Sklotextit je vrstvený materiál ve tvaru desek (Obr. 43), tyčí nebo trubek, vyrobený z upravené skelné tkaniny jako výztuže a epoxidové živice jako pojiva. Mimo dobrých mechanických, elektroizolačních a fyzikálních vlastností má vysokou klimatickou odolnost a minimální nasákavost. Vysoká dielektrická pevnost, nízký ztrátový činitel a vysoká tepelná odolnost předurčují daný materiál k použití na zařízeních s plným elektrickým výkonem.



Obr. 43 Sklotexitová deska pro obrábění.

Je ideálním materiálem na výrobu součástek pro elektrická zařízení při vyšších teplotách nebo ve vlhkém prostředí, u namáhaných elektroizolačních součástí, jako kostry tělesa přístrojů, skříňových částí transformátorů, rozvaděčů, elektrických strojů aj. Desky se mohou opracovávat řezáním, soustružením, frézováním, vrtáním.

Třetím typem zvoleného materiálu pro výrobu ložiskových desek testovacího axiálního motoru volím materiál označovaný jako EP GC 201, což je jeden z řady kompozitů pro elektrotechniku. Volím tento typ s ohledem i na jeho nenasákavost oproti Kartitům nebo Textitům, které obsahují nasákové pojivo jako je papír a textil. Zvolené, komerčně označované Sklotexitové desky lze běžně opracovat frézováním do výsledného tvaru. Tento materiál je nejčastěji využívaným konstrukčním materiálem v elektrotechnice. Díky své dielektrické povaze by tento materiál měl být vhodnou volbou k eliminaci magnetických ztrát, jelikož se na tomto ději vůbec nepodílí.

6.2 Kontrola fyzikálních vlastností navržených materiálů

V rámci disertační práce jsme ověřili fyzikální vlastnosti navržených materiálů pro ložiskové desky. Skládá se z následujících oblastí.

- *Zdokumentování strukturních vlastností.*
- *Stanovení chemického složení.*
- *Mechanické zkoušky pevnosti a tvrdosti.*
- *Stanovení elektrických a magnetických vlastností.*

6.2.1 Mikrostruktura navržených vzorků

Dokumentace mikrostruktury byla provedena na třech navržených typech vzorků odebraných z materiálu polotovarů pro výrobu ložiskových desek experimentálního motoru AlCu4PbMgMn , $\text{X2CrNi18-9a EP GC 201}$.



Obr. 44 Materiály označované AlCu4PbMgMn , X2CrNi18-9a a EP GC 201 připravené pro mikrostrukturní studium.

Mikrostrukturní studium bylo prováděno pomocí optického mikroskopu Olympus IX70 viz Obr. 45.

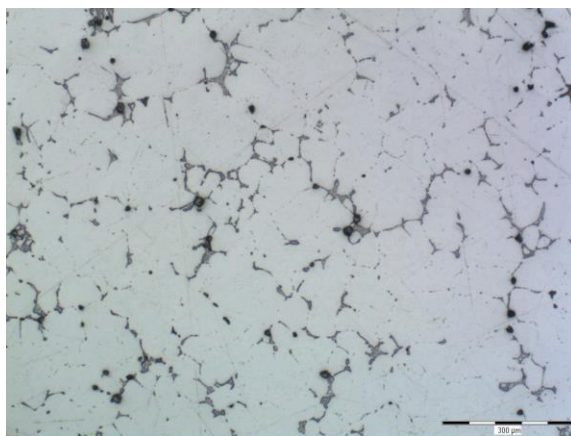


Obr. 45 Olympus IX70

Mikrostruktura materiálu X2CRNi18-9 (austenitické oceli) byla zviditelněna pomocí leptání ve V2 (vodný roztok $\text{HCl} + \text{HNO}_3$). Metalografický výbrus Al-slitiny byl finálně leštěn na plátně OP-Chem. Semikvantitativní rtg. mikroanalýza Al-slitiny byla provedena pomocí analyzátoru Inca X-act jako plošná analýza na řádkovacím elektronovém mikroskopu JEOL JSM-6490LV.

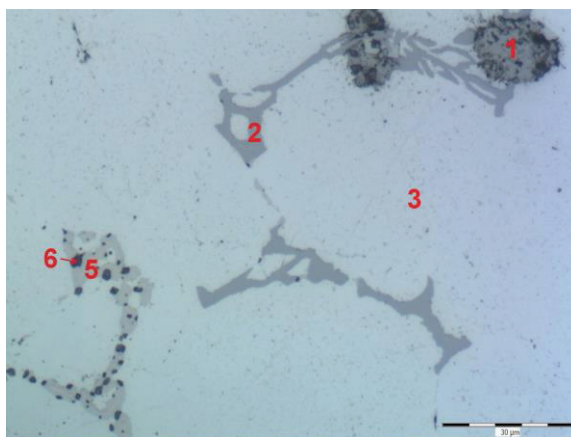
Materiál AlCu4PbMgMn

Dle provedené mikrostruktury na konkrétním materiálu AlCu4PbMgMn pro ložiskové desky bylo pozorováno, že se jedná o litý stav pod eutektické Al-slitiny. To bylo vyvozeno ze snímků (Obr. 46 a Obr. 47) pořízených na optickém mikroskopu.



Obr. 46 Mikrostruktura vzorku AlCu4PbMgMn. Optický mikroskop.

Mikrostruktura slitiny je tvořena tuhým roztokem (Al) a eutektikem (Al)+ CuAl_2 . Mikrostruktury jsou patrné intermetalické částice na bázi AlFeMnSi ve formě tzv. „čínského písma“ a globulární částice.

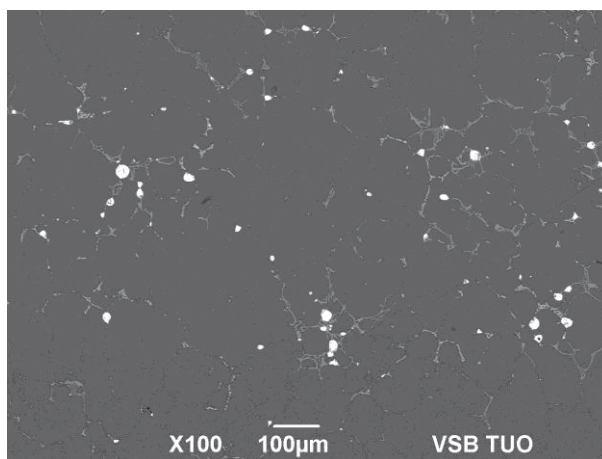


Obr. 47 Mikrostruktura vzorku AlCu4PbMgMn, detail. Optický mikroskop.

Pomocí semikvantitativní rentgenové mikroanalýzy bylo zjištěno, že se jedná o slitinu AlCuMgPb (plošná analýza viz Tabulka 2; 3,5 hm. % Cu, 0,5 hm. % Mg, 0,7 hm. % Pb) viz Obr. 48, Obr. 49, Obr. 50 a Obr. 51.

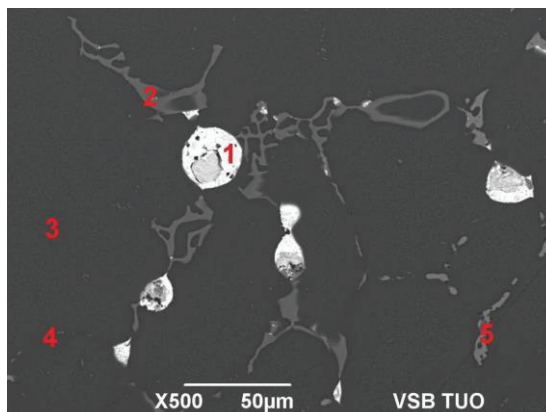
Tabulka 2 Semikvantitativní rtg. mikroanalýza v hm. % v místech na Obr. 49

Místo analýzy	O	Mg	Al	Si	Mn	Fe	Cu	Pb
plošná	-	0,53	93,82	0,43	0,58	0,42	3,53	0,70
1	3,22	-	1,25	-	-	-	-	95,53
2	-	-	59,60	7,90	9,47	16,90	6,12	-
3	-	0,51	95,64	0,34	0,69	-	2,83	-
4	-	0,45	97,72	-	-	-	1,83	-
5	0,71	1,07	49,17	0,69	-	-	48,36	-
6	13,82	13,98	49,05	14,91	-	-	8,24	-



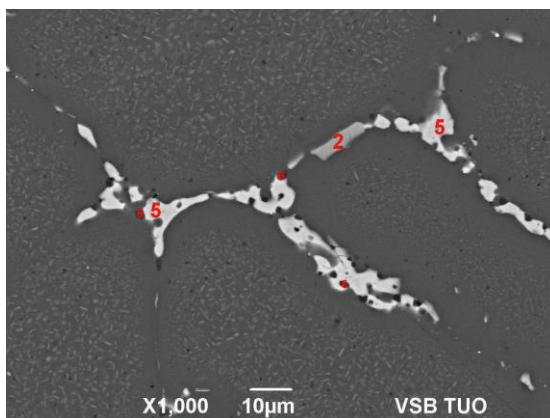
Obr. 48 Mikrostruktura vzorku AlCu4PbMgMn. SEM.

Globulární částice představují oxidy olova (Tabulka 2). Částice 2 podél hranic zrn (ve formě tzv. čínského písma) obsahují vyšší podíl železa a dalších prvků (16,9 hm. % Fe; 9,5 hm. % Mn; 7,9 hm. % Si a 6,1 hm. % Cu viz analýza 2 v Tabulka 2). Zrna jsou tvořena tuhým roztokem α (analýza 3 viz Tabulka 2). Hranice zrn vykazují nižší podíl Si, Mn a Cu (analýza č. 4 viz Tabulka 2).



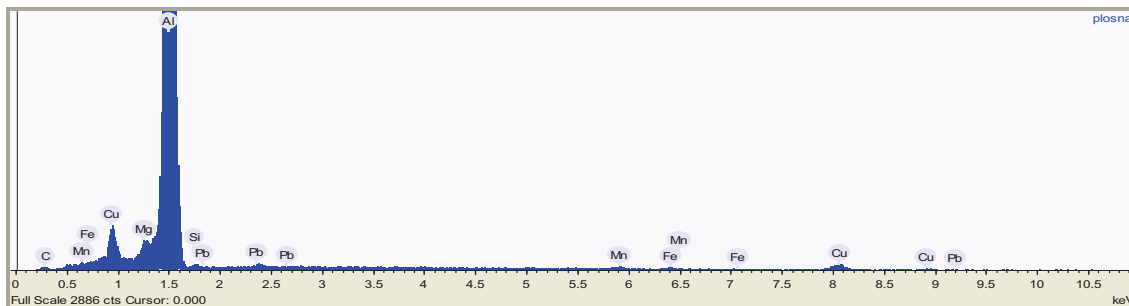
Obr. 49 Mikrostruktura vzorku AlCu4PbMgMn. SEM

V případě částic ozn. 5 se jedná o CuAl_2 s vysokým podílem Cu (48,4 hm. % Cu, 49,2 hm. % Al viz analýza 5 v tabulce 1).



Obr. 50 Mikrostruktura vzorku AlCu4PbMgMn. SEM.

Černé útvary v místě částic CuAl_2 představují drobné komplexní oxidy na bázi Al, Si a Mg (analýza 6 viz Tabulka 2).



Obr. 51 Spektrum odpovídající plošné analýze vzorku AlCu4PbMgMn. EDX.

Materiál X2CrNi18-9

Výsledky mikrostrukturní analýzy potvrdily, že se jedná o korozivzdornou chromniklovou ocel AISI 304 (Wr.N. 1.4307, X2CrNi18-9). Toto značení oceli bylo odečteno přímo z polotovaru pro výrobu ložiskové desky. Z označení materiálu X2CrNi18-9 lze odvodit průměrné chemické složení 0,02 % C, 18 hm. % Cr a 9 hm. % Ni, což odpovídá AISI 304L s nižším obsahem uhlíku.



Obr. 52 Mikrostruktura vzorku X2CrNi18-9 kraj, podélný řez. Optický mikroskop

Mikrostruktura oceli X2CRNI18-9 je austenitická s řádkovitě vyloučeným δ -feritem (Obr. 52, Obr. 53, Obr. 54, Obr. 55). Vyšší podíl δ -feritu byl pozorován ve středu tloušťky plechu.



Obr. 53 Mikrostruktura vzorku X2CrNi18-9 – kraj, podélný řez, detail. Optický mikroskop



Obr. 54 Mikrostruktura vzorku X2CrNi18-9 – střed, podélný řez. Optický mikroskop



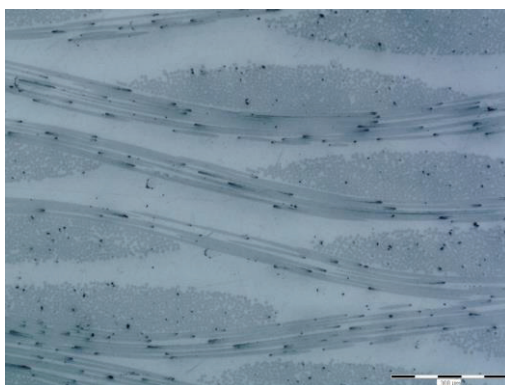
Obr. 55 Mikrostruktura vzorku X2CrNi18-9 – střed, podélný řez, detail. Optický mikroskop

Materiál EP GC 201

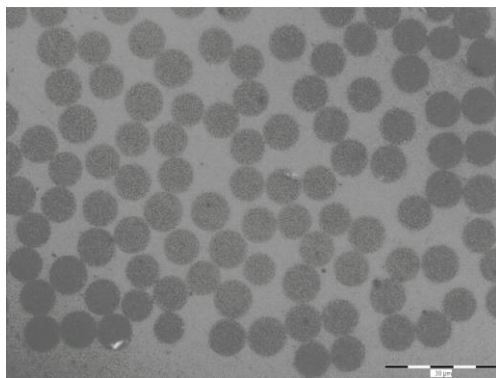
Jedná se o vláknový kompozitní materiál komerčně nazývaný sklotextit s polymerní matricí vyztužený skelnými vlákny ve formě tkaniny o průměru skelných vláken $9,6 \pm 0,4 \mu\text{m}$ (Obr. 56 a Obr. 57). Jeho vlastnosti jsou uvedeny v Tabulka 3 z katalogového listu dodavatelské firmy.

Tabulka 3 Vlastnosti materiálu EP GC 201 z katalogového listu firmy ARCO Technic

Norma	DIN – EN 60893-3-2
Označení	EP GC 201
Typ pojiva	Epoxy
Měrná hmotnost	2g/cm^3
Pevnost v tahu	350 Mpa
Izolační odpor	5×10^8
Permitivita	4
Teplotní zatížitelnost	130°C



Obr. 56 Mikrostruktura vzorku EP GC 201. Optický mikroskop.



Obr. 57 Mikrostruktura vzorku EP GC 201, detail. Optický mikroskop.

6.2.2 Mechanické zkoušky navržených vzorků

Mechanické zkoušky v tahu vzorků z ložiskových desek experimentálního motoru byly prováděny na trhacím stroji Multipurpose Servohydraulic Universal Testing Machine Series LFV 100kN viz Obr. 58.



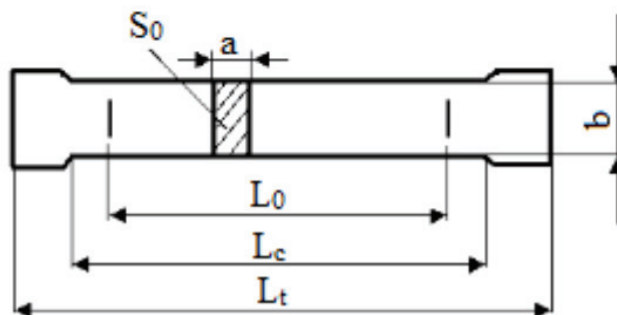
Obr. 58 Multipurpose Servohydraulic Universal Testing Machine Series LFV 100kN

Měření tvrdosti bylo prováděno na tvrdoměru HPO 250.

Tahová zkouška

Tahové zkoušky bylo podrobena celkem 4ks vzorků od každého druhu materiálu viz Obr. 60. Zkoušky byly provedeny dle národní normy ČSN EN10002, res. evropské normy EN 10002:90. Zkouška probíhala v rychlosti 2mm/min do přetržení pro stanovení mechanických vlastností zavedených v normě. Zkouška probíhala při okolní teplotě v rozmezí od 10 °C do 35 °C dle normy. Zkouška byla prováděna pro ověření napětí na mezi pevnosti navržených materiálů a skutečných materiálů pro výrobu experimentálních dílů motoru. Vzorky byly připraveny dle normy ČSN EN ISO 6892-1, zkouška

je založena na plynulém zatěžování normalizované zkušební tyče až do jejího přetržení. Normalizovaná zkušební tyč je obdélníkového průřezu viz Obr. 59.



Obr. 59 Rozměry normalizované zkušební tyče pro tahovou zkoušku (Handbook, 2003)

Jsou stanoveny dva typy zkušebních tyčí, a to poměrné a nepoměrné. Pro poměrné tyče je jednoznačně dán poměr k počáteční měřené délce L_0 k druhé odmocnině počátečního S_0 . Doporučené hodnoty k jsou 5,65 a 11,3. Kompozitní materiály mají zkušební vzorky v podobě jednoduchých pásů v o definované velikosti, v našem případě ve jmenovitém rozměru 250x25x6mm.

Konkrétní rozměry zkoušených tyčí jsou uvedeny v Tabulka 4, Tabulka 5, Tabulka 6.

Tabulka 4 Naměřené rozměry zkušebních tyčí z materiálu X2CrNi18-9

X2CrNi18-9	a_0 [mm]	b_0 [mm]	S_0 [mm ²]	L_0 [mm]	a_u [mm]	b_u [mm]	S_u [mm ²]	L_u [mm]
T1	5,98	20,03	119,78	90,00	3,93	13,05	51,29	133,80
T2	5,98	20,05	119,90	90,00	3,35	13,22	44,29	133,87
T3	5,98	20,05	119,90	90,00	3,28	13,54	44,41	133,56
T4	5,98	20,04	119,84	90,00	3,33	13,33	44,39	134,00

Tabulka 5 Naměřené rozměry zkušebních tyčí z materiálu AlCu4PbMgMn

AlCu4PbMgMn	a_0 [mm]	b_0 [mm]	S_0 [mm ²]	L_0 [mm]	a_u [mm]	b_u [mm]	S_u [mm ²]	L_u [mm]
T1	5,90	20,02	118,12	90,00	5,74	19,51	111,99	93,84
T2	5,87	20,03	117,58	90,00	5,78	19,58	113,17	94,05
T3	5,86	20,02	117,32	90,00	5,72	19,56	111,88	92,41
T4	5,85	20,02	117,12	90,00	5,73	19,52	111,85	92,52

Tabulka 6 Naměřené rozměry zkušebních tyčí z materiálu EP GC 201

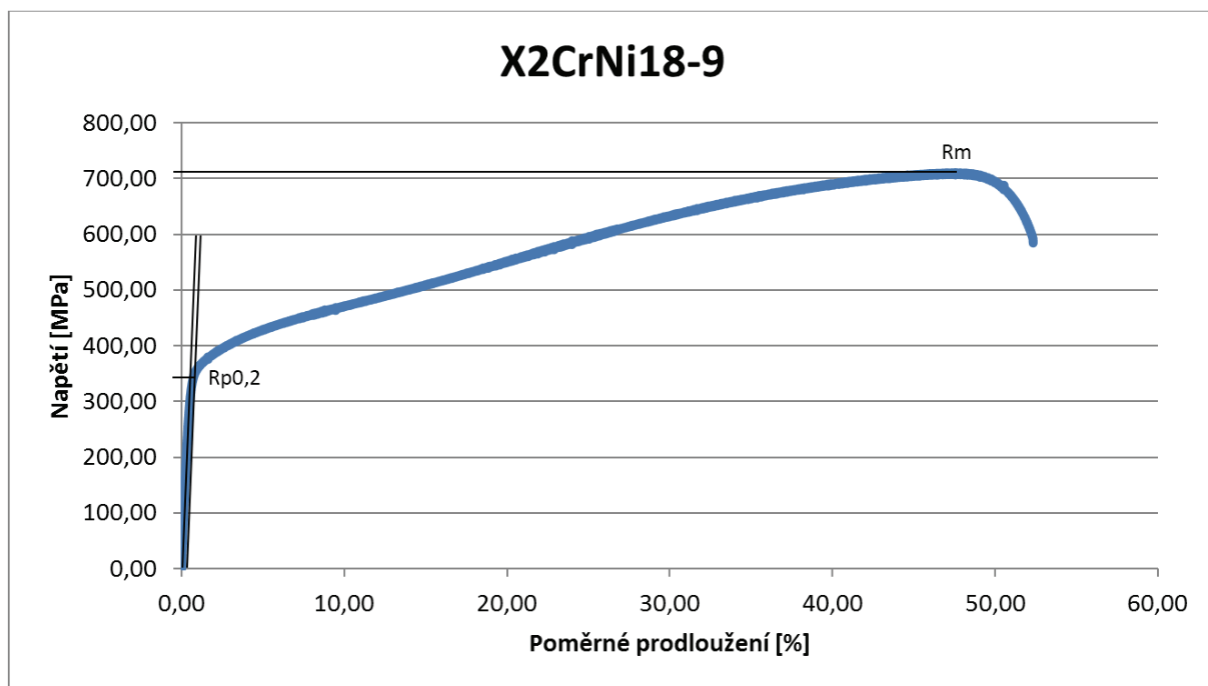
EP GC 201	a_0 [mm]	b_0 [mm]	S_0 [mm ²]	L_0 [mm]	a_u [mm]	b_u [mm]	S_u [mm ²]	L_u [mm]
T1	5,96	25,30	150,79	150,00	5,96	25,30	150,79	150,00
T2	5,97	25,37	151,46	150,00	5,97	25,37	151,46	150,00
T3	6,01	25,50	153,26	150,00	6,01	25,50	153,26	150,00
T4	5,97	25,43	151,82	150,00	5,97	25,43	151,82	150,00

Poměrné zkušební tyče je nutné použít pro zkoušku, kde je požadováno určení tažnosti A. Zkušební vzorky jsou na krajích opatřeny hlavou, která slouží pro upnutí do čelistí zkušebního stroje tak, aby osa zkušební tyče ležela v ose čelistí stroje.



Obr. 60 Zkušební tyče pro mechanickou zkoušku tahu materiálů ALCU4PBMGMN, X2CrNi18-9, EP GC 201

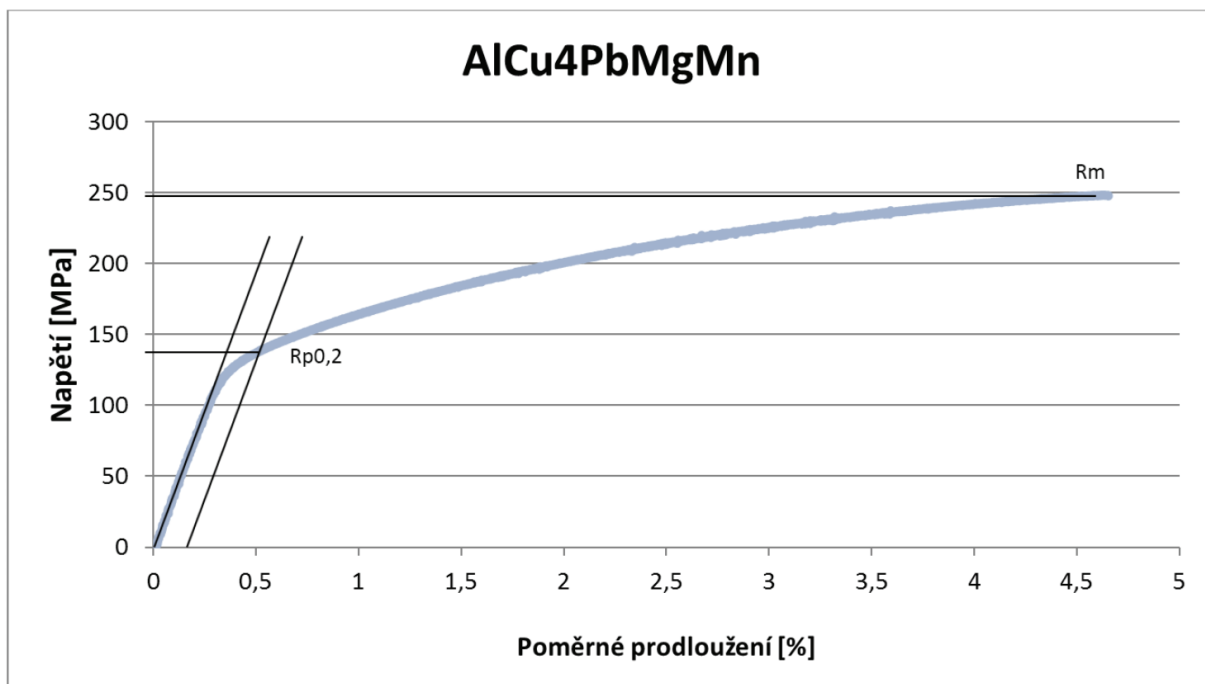
Jednotlivá měření byla zpracována a z nich vygenerovány souhrnné grafy z tahových zkoušek. U zkušebních tyčí z materiálu X2CrNi18-9 došlo k přetržení šikmým lomem u všech čtyř tyčí. U tyčí z materiálu AlCu4PbMgMn došlo ke křehkému lomu a u dvou tyčí z materiálu EP GC 201 došlo k delaminaci v ose vzorku.



Obr. 61 Graf závislosti napětí na deformaci pro materiál X2CrNi18-9

Tabulka 7 Naměřené hodnoty v rámci tahové zkoušky pro zkušební tyče z materiálu X2CrNi18-9

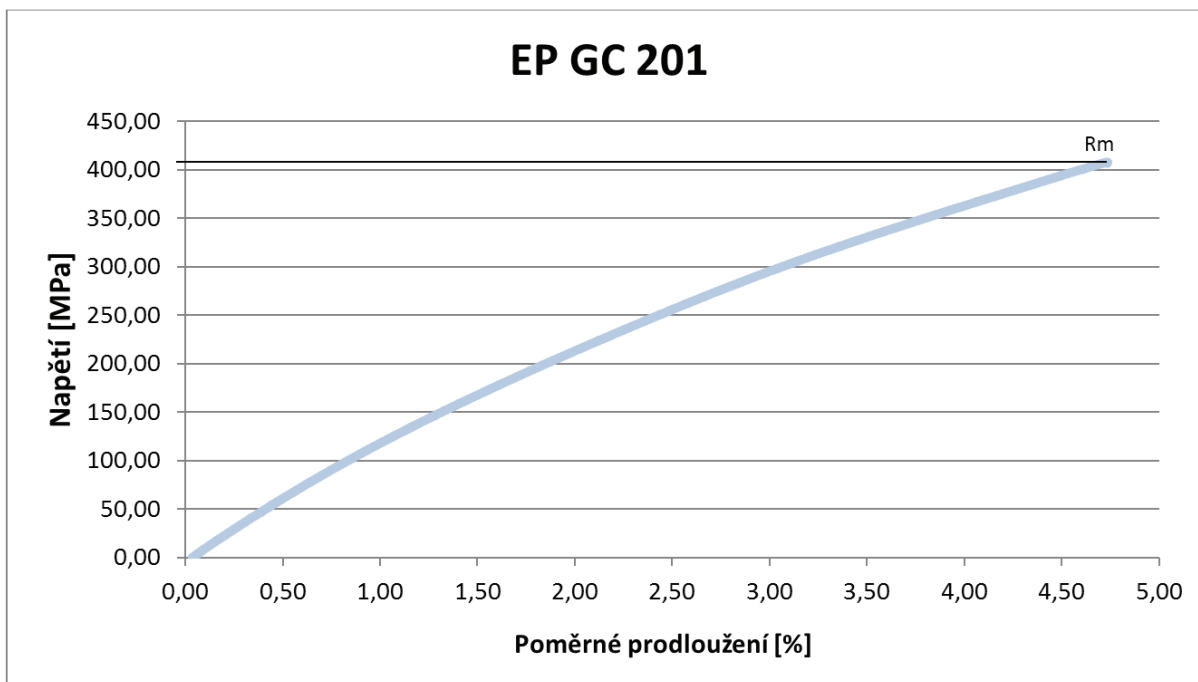
X2CrNi18-9	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{90} [%]	Z [%]
T1	345,81	710,74	48,67	57,18
T2	354,72	716,07	48,74	63,06
T3	356,00	717,84	48,40	62,96
T4	326,24	717,50	48,89	62,96
průměr	345,69	715,54	48,68	61,54
směr. odch.	11,90	2,85	0,18	2,52



Obr. 62 Graf závislosti napětí na deformaci pro materiál AlCu4PbMgMn

Tabulka 8 Naměřené hodnoty v rámci tahové zkoušky pro zkušební tyče z materiálu AlCu4PbMgMn

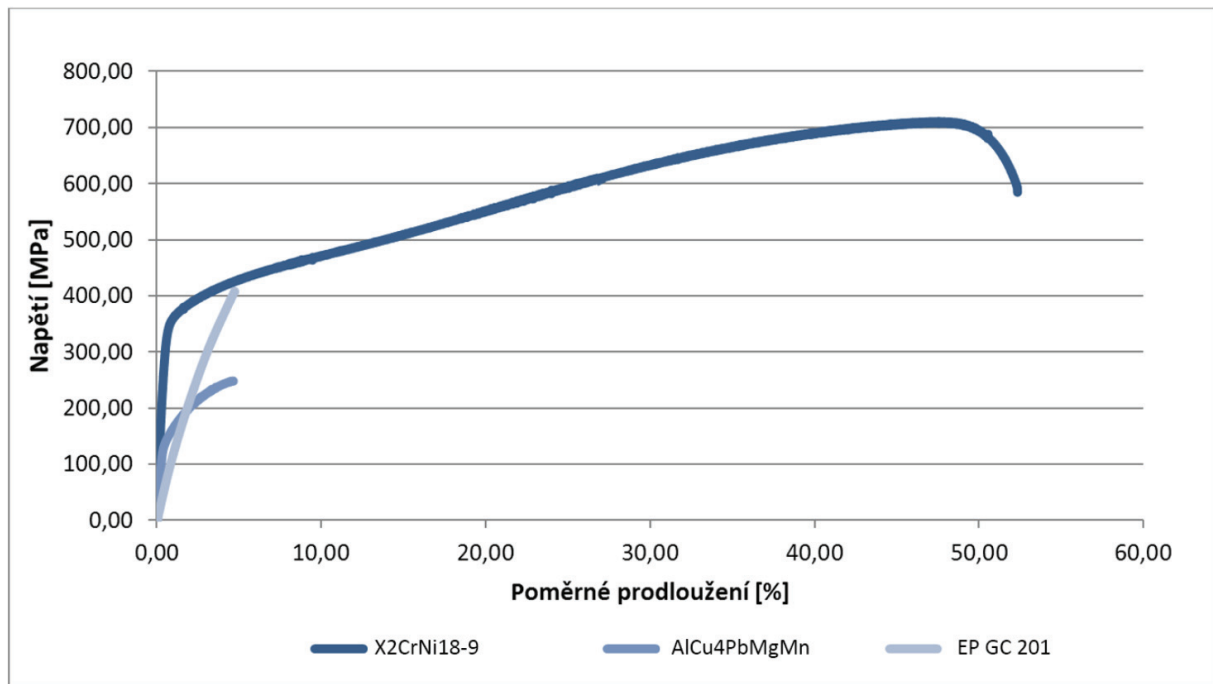
AlCu4PbMgMn	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{90} [%]	Z [%]
T1	140,74	248,48	4,50	3,75
T2	137,29	242,78	4,27	5,19
T3	133,48	232,57	2,68	4,63
T4	133,48	232,42	2,80	4,50
průměr	137,17	239,06	3,56	4,52
směr. odch.	2,97	6,58	0,81	0,59



Obr. 63 Graf závislosti napětí na deformaci pro materiál EP GC 201

Tabulka 9 Naměřené hodnoty v rámci tahové zkoušky pro zkušební tyče z materiálu EP GC 201

EP GC 201	Rp0,2 [MPa]	Rm [MPa]	A90 [%]	Z [%]
T1	-	408,07	-	-
T2	-	394,68	-	-
T3	-	419,31	-	-
T4	-	382,56	-	-
průměr	-	401,16	-	-
směr. odch.	-	13,83	-	-



Obr. 64 Graf závislosti napětí na deformaci porovnání X2CrNi18-9, AlCu4PbMgMn, EP GC 201

Při porovnání pevnosti v tahu ověřovaných vzorků lze snadno rozeznat nejlepší pevnostní parametry materiálu X2CrNi18-9 s mezí pevnosti na hranici 715 Mpa (mez kluzu 345 Mpa) a s vysokou tažností na hranici 49% do přetržení. Nejnižší pevností 239 Mpa (mez kluzu 137 Mpa) se vyznačuje materiál AlCu4PbMgMn, který má díky příměsím velmi nízkou tažnost kolem 3,6%. Uprostřed těchto dvou zmíněných materiálů je EP GC 201 s mezí pevnosti 401 Mpa a očekávanou nulovou tažností.

Měření tvrdosti dle Brinella HBW2,5/31,25

Měření tvrdosti jsme prováděli na tvrdoměru HPO 250. Metodu jsme zvolili podle Brinella s kalenou kuličkou o dvou silách zatížení pro důkladnější porovnání. Pro tuto tvrdost byla použita kalená kulička o průměru 2,5 mm. Přítlačná síla byla 306,6 N. Doba působení síly byla 10 sekund. Podrobné výsledky z měření jsou uvedeny v tabulkách Tabulka 10,

Tabulka 11 a Tabulka 12.

Tabulka 10 Výsledky měření tvrdosti HBW2,5 pro materiál X2CrNi18-9

X2CrNi18-9		d1 [mm]	d2 [mm]	Ø d [mm]	HB 2,5/31,25/10	
	1	0,488	0,485	0,487	166,7	
	2	0,481	0,477	0,479	172,0	
	3	0,475	0,467	0,471	178,0	
	4	0,469	0,464	0,467	181,4	
	5	0,465	0,462	0,464	183,8	
průměr/sm.od.					176,4	6,3

Tabulka 11 Výsledky měření tvrdosti HBW2,5 pro materiál AlCu4PbMgMn

AlCu4PbMgMn		d1 [mm]	d2 [mm]	Ø d [mm]	HB 2,5/31,25/10	
	1	0,698	0,707	0,703	79,1	
	2	0,702	0,698	0,700	79,7	
	3	0,704	0,706	0,705	78,5	
	4	0,698	0,699	0,699	80,0	
	5	0,702	0,702	0,702	79,2	
průměr/sm.od.					79,3	0,5

Tabulka 12 Výsledky měření tvrdosti HBW2,5 pro materiál EP GC 201

EP GC 201		d1 [mm]	d2 [mm]	Ø d [mm]	HB 2,5/31,25/10	
	1	0,783	0,777	0,780	63,8	
	2	0,846	0,812	0,829	56,3	
	3	0,814	0,837	0,826	56,8	
	4	0,838	0,852	0,845	54,1	
	5	0,807	0,807	0,807	59,5	
průměr/sm.od.					58,1	3,3

Měření tvrdosti dle Brinella HBW2,5/62,5

Pro tuto tvrdost byla použita kalená kulička o průměru 2,5 mm. Přítlačná síla byla 613,1 N. Doba působení síly byla 10 sekund. Podrobné výsledky z měření jsou uvedeny v tabulkách

Tabulka 14,

Tabulka 15 a Tabulka 1.

Tabulka 13 Výsledky měření tvrdosti HBW2,5 pro materiál X2CrNi18-9

X2CrNi18-9	d1 [mm]	d2 [mm]	Ø d [mm]	HB 2,5/62,5/10	
1	0,644	0,657	0,651	185,0	
2	0,641	0,648	0,645	188,6	
3	0,639	0,658	0,649	186,2	
				186,6	1,5

Tabulka 14 Výsledky měření tvrdosti HBW2,5 pro materiál AlCu4PbMgMn

AlCu4PbMgMn	d1 [mm]	d2 [mm]	Ø d [mm]	HB 2,5/62,5/10	
1	0,957	0,950	0,954	84,3	
2	0,958	0,957	0,958	83,6	
3	0,961	0,951	0,956	83,9	
				83,9	0,3

Tabulka 15 Výsledky měření tvrdosti HBW2,5 pro materiál EP GC 201

EP GC 201	d1 [mm]	d2 [mm]	Ø d [mm]	HB 2,5/62,5/10	
1	1,069	1,031	1,050	68,9	
2	1,035	1,032	1,034	71,3	
3	1,041	1,045	1,043	69,9	
				70,0	1,0

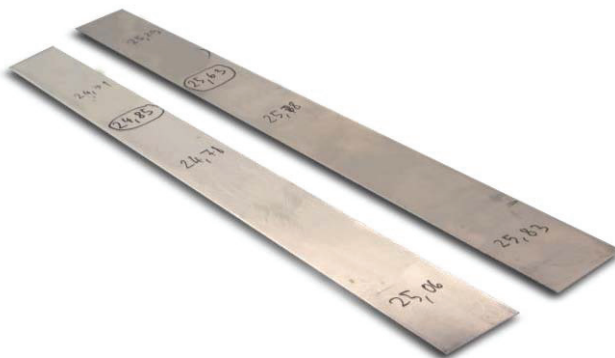
6.2.3 Zkouška elektrických vlastností

Zkoušky měření hysterezních smyček a měření permeability byly prováděny na zařízení Brockhaus Messtechnik SST 30x250 viz Obr. 65 a v programu pro zpracování naměřených dat Remacomp C 6.0.



Obr. 65 Brockhaus Messtechnik SST 30x250

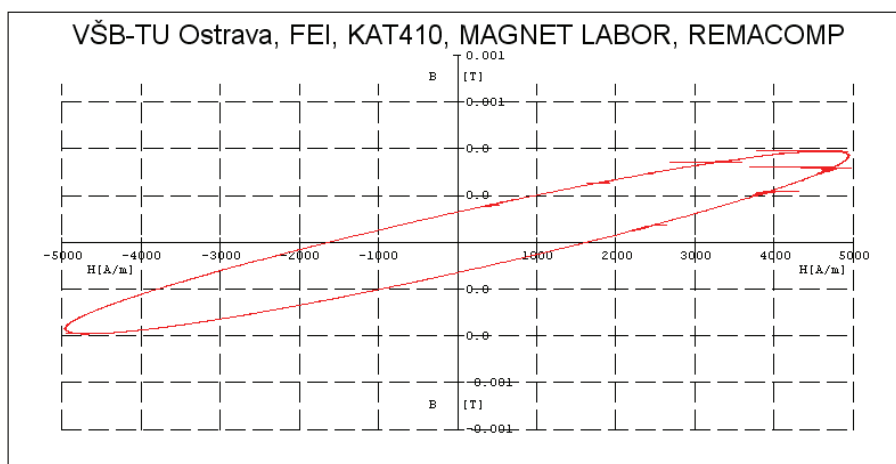
Zkoušené vzorky byly připraveny z materiálu X2CrNi18-9 a AlCu4PbMgMn na požadovaný rozměr 25x250x1 viz Obr. 66, vhodný pro prostor měřicí cívky. Materiál EP GC 201 jsme netestovali, tyto elektromagnetické vlastnosti jsou u tohoto materiálu neměřitelné. Rozměry vzorků byly proměřeny a přesné rozměry vloženy do programu pro přesný výpočet objemu vzorků.



Obr. 66 Vzorky 25x250x1 pro měření hysterezních smyček z materiálu X2CRNI18-9 a ALCU4PBMGMN.

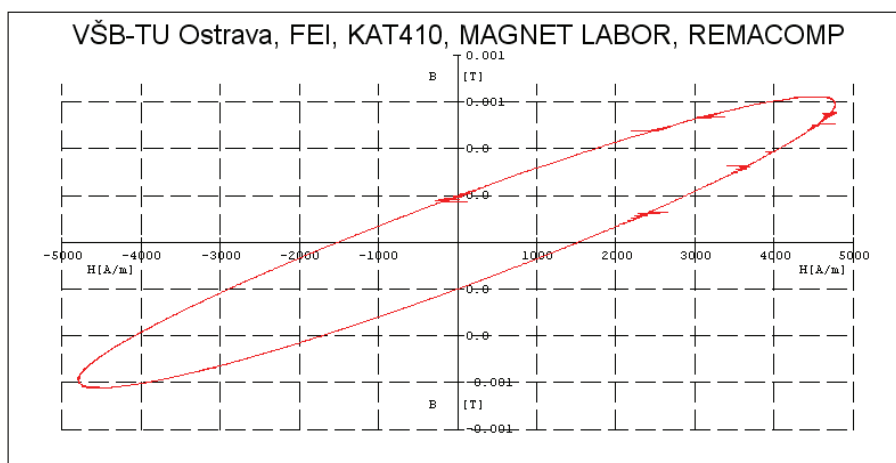
Měření BH charakteristiky

Zkouška probíhala při referenční frekvenci 1000 Hz a intenzitou magnetického pole 5000 A/m. Z grafů na Obr. 67 a Obr. 68 je patrné, že u měřeného materiálu X2CRNi18-9 vykazuje hysterezní smyčka menší obsah, tedy menší ztráty oproti materiálu AlCu4PbMgMn, který má obsah smyčky nepochybně větší.



Obr. 67 Graf z měření hysterezní smyčky pro materiál X2CrNi18-9

Bohužel kvůli omezeným rozsahům měřicího zařízení jsme nebyli schopni provést další měření pro různé frekvence a intenzitu magnetického pole, které by zmapovalo charakteristiku materiálu pro větší rozsah použití.



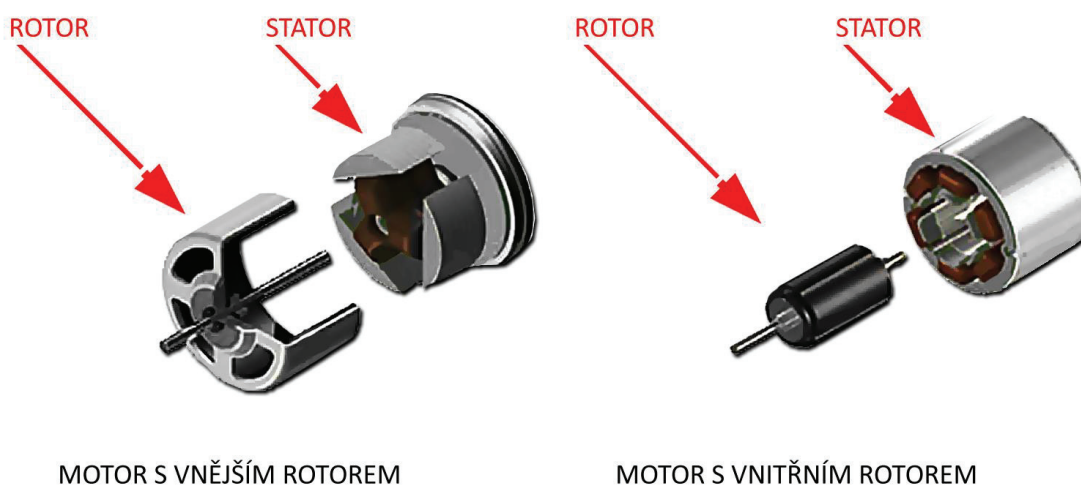
Obr. 68 Graf z měření hysterezní smyčky pro materiál AlCu4PbMgMn

6.3 Vývoj experimentálního axiálního motoru

Dalšími výstupy disertační práce jsou návrh, výroba a stavba vývojového motoru určeného pro testování ložiskových desek. Toto je rozsáhlá část zahrnující potřebné výpočty, simulace, výrobní postupy, volbu polotovarů a technickou dokumentaci.

6.3.1 Varianty řešení, konstrukční uspořádání stroje

Jako základní konstrukční uspořádání stroje pro tuto pohonnou jednotku lze použít dnes běžně užívané motory s radiálním magnetickým polem ve variantě vnitřní rotor-vnější stator, případně vnější rotor-vnitřní stator, viz Obr. 69.



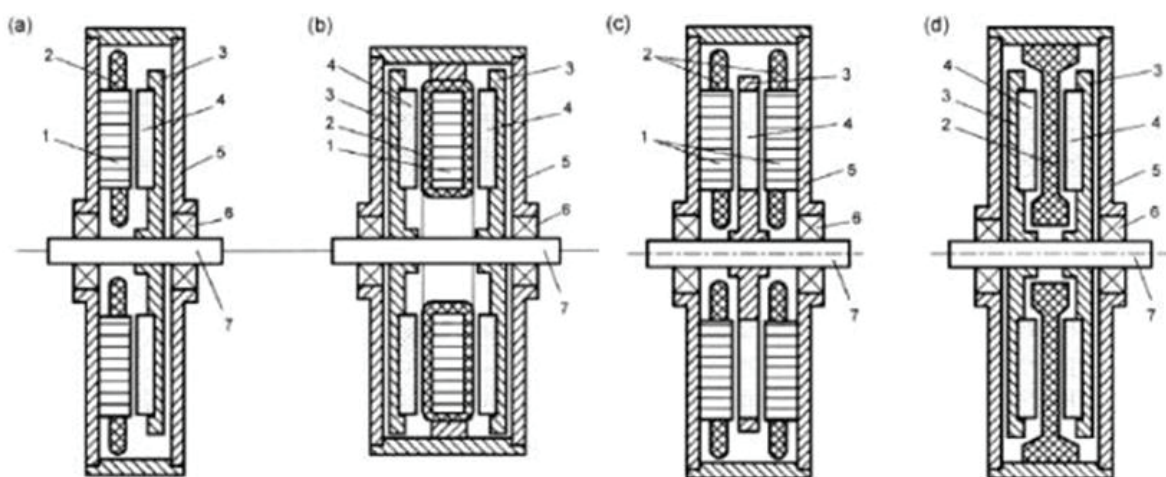
Obr. 69 Zobrazení uspořádání točivého stroje s vnitřním a vnějším rotorem

Asynchronní motor je dnes nejpoužívanější typ stroje, který lze nalézt ve všech oblastech vyžadujících konstrukčně jednoduchý pohon s vysokou provozní spolehlivostí a relativně dobrou účinností. Nevýhodou asynchronního motoru z pohledu regulace je pak jeho velký záběrný proud a citlivost otáček na změnu zatížení, což klade vysoké nároky na frekvenční měnič. Další nevýhodou je rovněž závislost výstupního momentu asynchronního motoru, která se mění se čtvercem napájecího napětí.

V oblasti pohonů nacházejí v poslední době své uplatnění právě synchronní stroje s permanentními magnety (PM). I když svou konstrukcí odpovídají střídavým synchronním strojům, ve kterých jsou jako zdroj budícího magnetického pole využity permanentní magnety, setkáváme se častěji s názvem bez-kartáčový stejnosměrný stroj s permanentními magnety (Brushless Permanent Magnet DC Motor). Podobně jako u asynchronních strojů se i zde můžeme setkat s variantami konstrukčního uspořádání s vnitřním či vnějším rotorem.

Abychom dosáhli vysoké hustoty výkonu na jednotku objemu (hmotnosti) stroje, je vhodnější zvolit uspořádání motoru s axiálním magnetickým polem (diskový motor).

Existuje několik základních (Gieras, 2002)h konstrukčních provedení, které můžeme rozdělit podle vzájemného provedení a umístění statoru a rotoru a jejich počtu v daném stroji. Na Obr. 70 (a-d) jsou taková uspořádání dobře patrná. (Gieras, 2004) (Gieras, 2002)

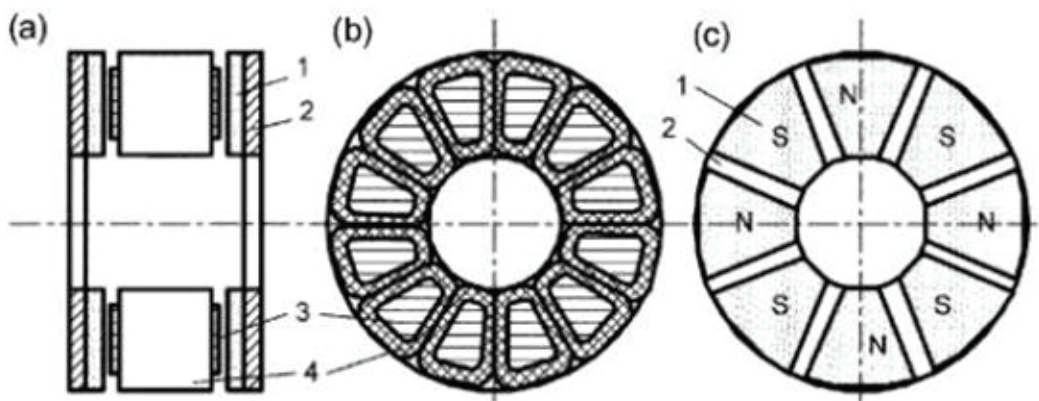


Obr. 70 Základní topologie strojů s axiálním magnetickým polem (Gieras, 2004)

Na Obr. 70 dále popisky znamenají: 1 – jádro statoru, 2 – statorové vinutí, 3 – rotor, 4 – permanentní magnety, 5 – kostra stroje, 6 – ložiska, 7 – hřídel. (Gieras, 2004)

Na Obr. 71 je vidět rozložené základní konstrukční uspořádání $2p = 8$ pólového axiálního stroje s vnitřním statorem s vyniklými póly a dvojitým vnějším rotorem.

Tuto základní koncepci dále použijeme jako základní konstrukční variantu navrhovaného motoru.



Obr. 71 Axiální stroj s vnitřním statorem a dvojitým vnějším rotorem: 1 – permanentní magnety, 2 – jádro rotoru, 3 – póly statoru ($2p = 8$), 4 – vinutí statoru. (Gieras, 2004)

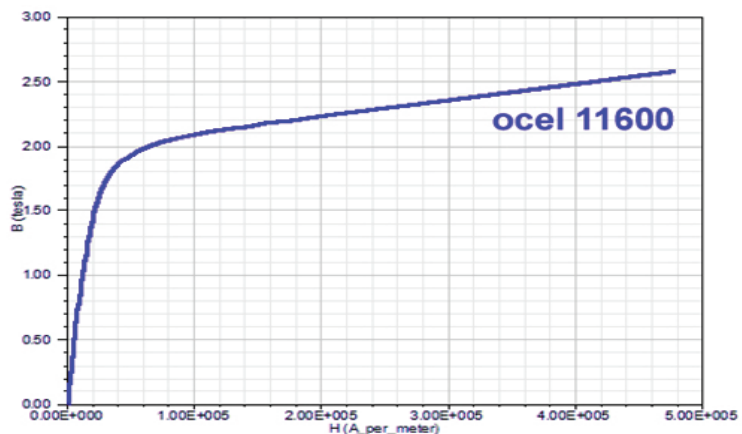
Výpočetní metodika návrhu základních rozměrů a hlavních parametrů asynchronních či synchronních strojů s radiálním magnetickým polem je poměrně dobře zmapovaná a vychází z vnitřního výkonu stroje, který je úměrný jeho kubatuře - D^2L , kde D je vnitřní průměr statoru a L je délka statorového svazku. (Kopylov, 1988)

6.3.2 Magnetický obvod axiálního motoru s dvojitým vnějším rotorem

Magnetický obvod axiálního stroje s dvojitým vnějším rotorem se skládá z rotoru a statoru, magnetický tok – Φ se uzavírá přes dvojitou vzduchovou mezeru, která je obvykle malá, cca do $\delta = 5\text{mm}$.

Vnější rotor (disk) je zhotoven z magneticky vodivého materiálu (ocel). Na čele rotoru jsou připevněny permanentní magnety, které mají obvykle tvar kruhové výseče. Postupně po obvodu rotoru se polarita magnetů mění: N – S – N – S ... atd., dokud není dosaženo potřebného počtu pólů. Vnější rotor na druhé straně je ze stejného materiálu a magnety na něm jsou pootočený o pólouhou rozteč, tedy S – N – S – N ... atd. tak, aby se po přiblížení obou rotorů k sobě magnetické pole uzavíralo (posilovalo) přes vyniklé póly statoru. Z pohledu tloušťky nesmí být rotor stroje příliš tenký, protože by docházelo na vnější straně k velkému rozptylu magnetického pole. Z hlediska mechanického namáhání musí mít rotor také potřebnou mechanickou pevnost a tuhost, protože tah magnetů (axiální přitažlivá síla) dosahuje obrovských hodnot a axiální síla tahu permanentních magnetů by mohla způsobit jeho deformaci.

Z hlediska výpočtu magnetického obvodu je důležitá B-H charakteristika použitého materiálu rotoru, viz Obr. 72. Jedná se o ocel se zaručenými magnetickými vlastnostmi a je běžně používaným konstrukčním materiálem magnetických obvodů elektrických strojů.



Obr. 72 B-H magnetizační charakteristika oceli 11600 (Gieras, 2002)

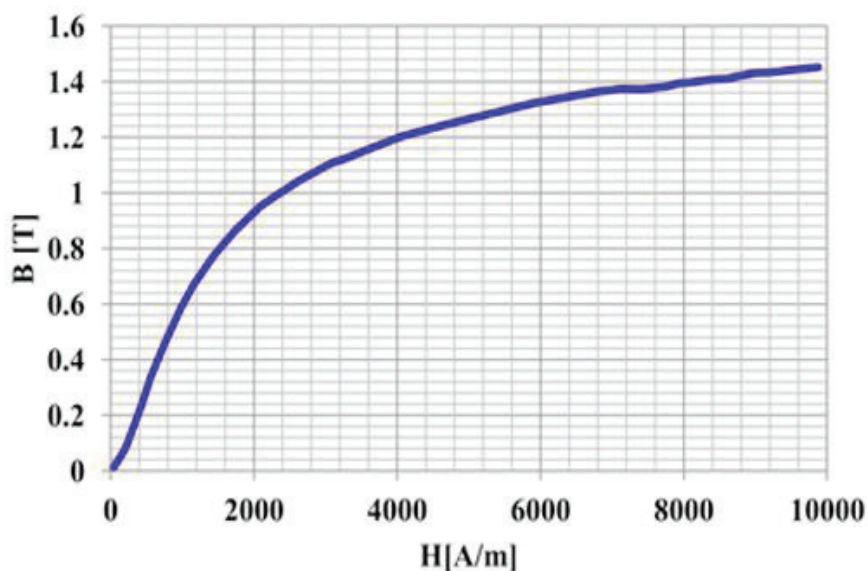
Jak bylo výše uvedeno, je stator axiálního motoru tvořen vyniklými póly. Na těchto pólech je uloženo statorové vinutí, obvykle 3-fázové. U mnohápólového provedení axiálního stroje dosahuje napájecí frekvence - f vyšších hodnot, než je tomu obvyklé u klasických strojů, a proto je potřeba zvolit nejen vhodný typ materiálu statoru, ale také jeho konstrukční provedení, aby ztráty vířivými proudy byly co nejmenší.

V zásadě existují dvě možnosti. Materiál statoru je vytvořen práškovou technologií (Somaloy), kde je mu v lisovací formě předepsán požadovaný tvar, nebo druhá možnost, stator je složen z tenkých plechů pro elektrotechniku do potřebného tvaru pólového nástavce. S ohledem na velikost napájecí frekvence a také z důvodu minimalizace ztrát vířivými proudy je doporučena tloušťka plechů – $tl < 0.2\text{mm}$, viz Obr. 73. (Gieras, 2004)



Obr. 73 Póly ze Somaloy (SGTechnologies, 2014)

Na Obr. 74 je vidět B-H magnetizační charakteristika materiálu Somaloy. Jako B-H charakteristika materiálu statoru je i tato důležitá při výpočtu magnetického obvodu axiálního stroje.

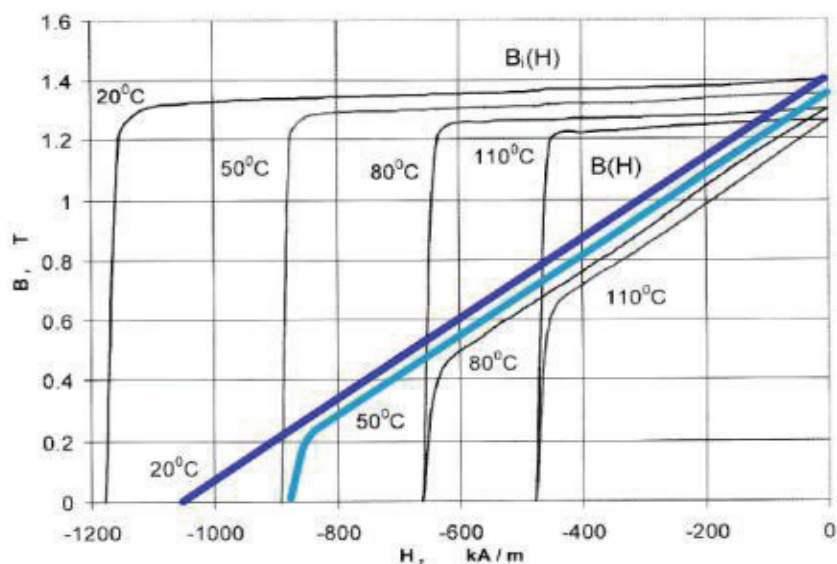


Obr. 74 B-H magnetizační charakteristika materiálu pólů, Somaloy (Slusarek, a další, 2014)

Magnety, které vytvářejí magnetické pole rotoru, patří do skupiny tzv. magnetů vzácných zemin a nesou označení NdFeB s přidruženou identifikací např. N35, N42, N52. Označení magnetů představuje kvalitu jejich magnetizace, resp. jak velké dosahují hodnoty koercitivní síly – HC a remanentní magnetické indukce - BR. (SINOMAG, 2016)

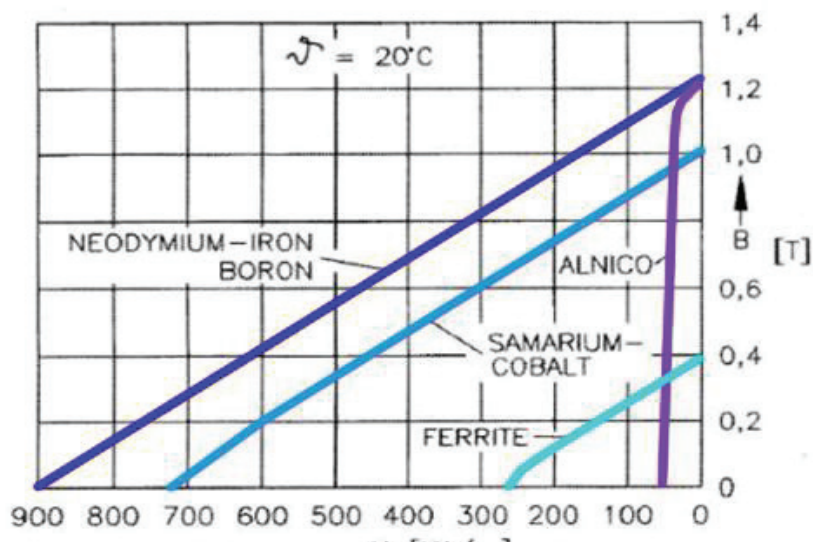
Technologie výroby magnetů dnes umožňuje dosahovat velmi vysokých hodnot HC a BR na jednotku objemu, což předurčuje jejich použití právě jako budících magnetů v obvodech elektrických strojů. Parametry magnetu jsou silně závislé na teplotě, a proto je potřeba v konstrukci axiálního stroje pamatovat na hodnotu oteplení. Rotor axiálního stroje představuje poměrně velkou plochu, navíc ve spojení s otáčením rotoru dochází k velmi dobré ventilaci a odvodu tepla do okolí. (Gieras, 2004) (Gieras, 2002)

Při návrhu je důležité znát tzv. demagnetizační charakteristiku permanentních magnetů, ze které je rovněž patrná závislost parametrů H_C a B_R na teplotě, viz Obr. 75.



Obr. 75 Demagnetizační charakteristika magnetu NdFeB N48 (Gieras, 2004)

Jinak samozřejmě existují i jiné varianty magneticky tvrdých materiálů, cenově dostupnějších, ale porovnáním jejich parametrů zjistíme, že zdaleka nedosahují takových hodnot, jako v případě typu NdFeB, viz Obr. 76 Při jejich použití je potřeba počítat s navýšením rozměrů a tím i hmotnosti stroje.



Obr. 76 Demagnetizační charakteristiky různých typů magnetů (Gieras, 2004)

6.3.3 Vinutí statoru axiálního motoru s dvojitým vnějším rotorem

Na statorových pólech axiálního motoru s dvojitým vnějším rotorem je uloženo 3f vinutí, které vytváří 3f točivé magnetické pole. Vinutí je obvykle provedeno izolovaným měděným vodičem kruhového nebo profilovaného tvaru. Při použití profilovaného vodiče získáme lepší plnění cívky, u kruhového vodiče se naopak lépe provádí vlastní vinutí cívky. Při průměru vodiče – $d_v > 1,5\text{mm}$ se vinutí, vzhledem k tuhosti vodiče, provádí velmi obtížně. Je proto lépe celkový průřez rozdělit na několik dílčích menších průřezů a vinutí tak provést paralelními vodiči.

Vinutí je rovněž potřeba na kostře cívky mechanicky upevnit. To lze provést např. lepením, snáze se však zpevnění vinutí provádí jeho impregnací (ponořením) např. do epoxidové pryskyřice.

Při průchodu proudu vznikají ve vinutí ztráty dP_{Cu} , které se projevují oteplením cívek statoru. Jelikož cívky statoru leží uvnitř dvou diskových rotorů, je odvod tepla značně snížen. Při použití velké proudové hustoty, která je u velkých strojů obvyklá, je potřeba řešit odvod tepla nuceným chlazením. Stator tedy obvykle bývá vůči okolí hermeticky uzavřen a kolem cívek statoru protéká chladicí kapalina, která ztrátové teplo vznikající ve vinutí odvádí.

6.3.4 Zapojení 3f vinutí statoru

Na statoru stroje je uloženo 3f vinutí nejčastěji v drážkách, resp. navinuto na pólových nástavcích. Používá se jak jednovrstvé, tak i dvouvrstvé vinutí. V případě použití pólů na statoru je vhodné použít soustředné vinutí. Na Obr. 77 je vidět provedení rozloženého a soustředného vinutí uložené v drážkách a na pólech. Pro návrh stroje budeme dále uvažovat variantu soustředného vinutí, tedy vinutí uloženého na pólových nástavcích.



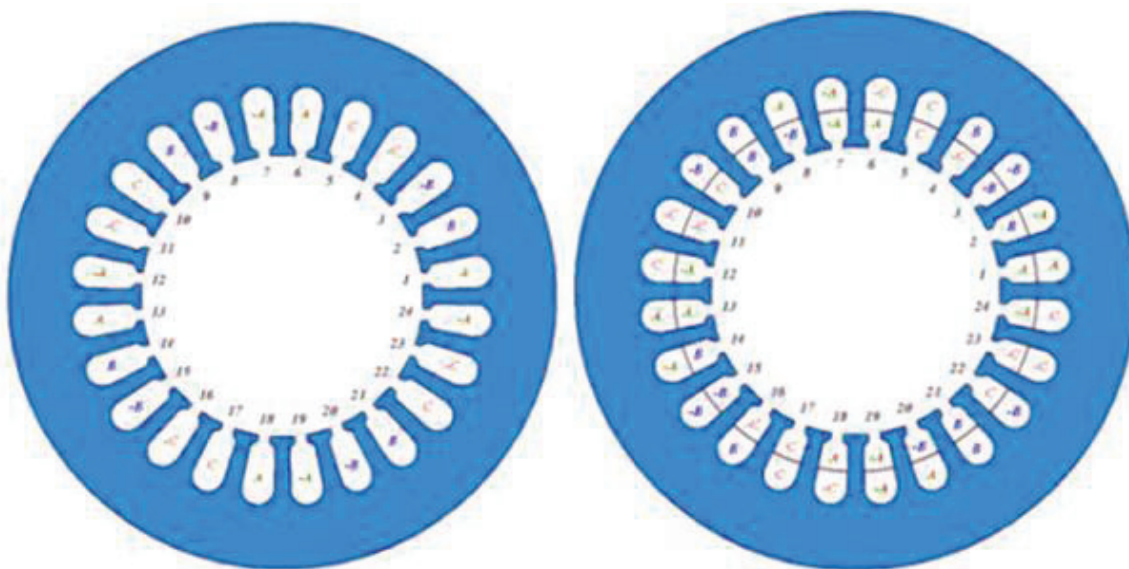
Obr. 77 Vinutí rozložené v drážkách a vinutí soustředné (Pyrhonen, 2008)

Ukázkou závislosti počtu drážek na stroji ve vztahu k počtu jeho pólů při čísle $q \leq 0,5$ je Obr. 78. Některé kombinace nejsou vůbec doporučené z důvodu velké nesymetrie magnetického pole po obvodu stroje nebo z důvodu nerovnoměrného magnetického tahu. Tučně jsou pak zobrazeny doporučené hodnoty při maximální hodnotě činitele vinutí – k_w .

Q_s		Počet pólů - $2p$	$2p$									
		4	6	8	10	12	14	16	20	22	24	26
6	k_{w1}	0.866	— ^a	0.866	0.5	— ^a	0.5	0.866	0.866	0.5	— ^a	0.5
	q	0.5		0.25	0.2		0.143	0.125	0.1	0.091		0.077
9	k_{w1}		0.866	— ^b	— ^b	0.866	0.617	0.328	0.328	0.617	0.866	0.945
	q		0.5	0.375	0.3	0.25	0.214	0.188	0.15	0.136	0.125	0.115
12	k_{w1}			0.866	0.933	— ^a	0.933	0.866	0.5	0.25	— ^a	0.25
	q			0.5	0.4		0.286	0.25	0.2	0.182		0.154
15	k_{w1}				0.866	— ^a	— ^b	— ^b	0.866	0.711	— ^a	0.39
	q				0.5		0.357	0.313	0.25	0.227		0.192
18	k_{w1}					0.866	0.902	0.945	0.945	0.902	0.866	0.74
	q					0.5	0.429	0.375	0.3	0.273	0.25	0.231
21	k_{w1}						0.866	0.89	— ^b	— ^b	— ^a	0.89
	q						0.5	0.438	0.35	0.318		0.269
24	k_{w1}							0.866	0.933	0.949	— ^a	0.949
	q							0.5	0.4	0.364		0.308

Obr. 78 Parametry a provedení zlomkového vinutí pro definovaný počet Q , $2p$. (Pyrhonen, 2008)

Uložení jedno a dvouvrstvého vinutí v $Q=24$ drážkách stroje při $q=2/5$ ukazuje Obr. 79.



Obr. 79 Ukázka jedno a dvouvrstvého vinutí pro $2p=20$, $m=3$, $Q=24$, $q=2/5$

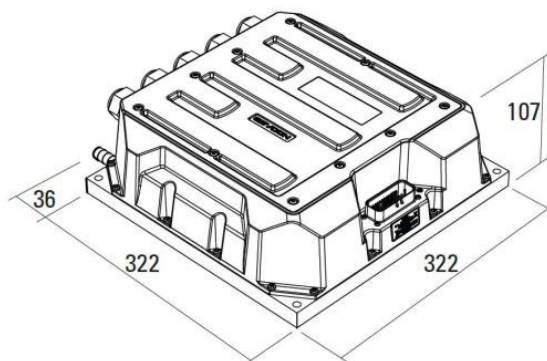
6.3.5 Základní rozměrový výpočet axiálního stroje

Než přejdeme k základnímu rozměrovému návrhu axiálního motoru, stanovíme základní parametry motoru. Tyto parametry jsou závislé na požadavcích dalšího využití motoru k pohonu elektromobilu StudentCar SXC. Elektromotor má sloužit jako základní pohonná jednotka. Návrh elektromotoru vychází z několika základních předpokladů:

- *Pohon kola automobilu bude realizován tak, že výkon elektromotoru je vyveden přímo na kolo přes kloubové spojení.*
- *Každé z kol automobilu bude mít vlastní elektromotor.*
- *Řízení (napájení) každého z motorů bude uskutečněno pomocí řídicí jednotky se zpětnou vazbou Sevcon Gen 4 viz Obr. 80.*

Jmenovité parametry zvolené řídicí jednotky elektromotoru Sevcon:

- *Určeno pro synchronní motory s permanentními magnety.*
- *Napájecí napětí do 400VDC.*
- *Špičkový výkon 100 kW.*
- *Jmenovitý výkon 60 kW.*
- *Vektorové řízení momentu.*
- *Integrovaný logický obvod.*
- *Jmenovité napájecí napětí 12V nebo 24V*
- *Splňuje normu ISO26262 ASIL C*



Obr. 80 Řídicí jednotka elektromotoru Sevcon Gen 4 Size 8 (Sevcon, 2012).

Předběžně byly parametry elektrického stroje stanoveny přepočtem z klasického spalovacího motoru přes převodovku automobilu, z čehož vyplynuly následující požadavky:

- *Výkon motoru:* $P_1 = 50 \div 60 \text{ kW}$ (celkově cca $4 \times P_1 = 240 \text{ kW}$)
- *Krátkodobá proudová přetížitelnost:* $EPS = 2$
- *Otáčky motoru:* $n = 0 \div 2000 \text{ ot/min}$
- *Záběrný moment:* $M_z = 400 \text{ Nm}$
- *Maximální hmotnost do:* $m_{MAX} = 40 \text{ kg}$

Vzhledem k nutnosti velkého záběrného momentu - M_z , který je nutný při rozběhu, lze již v této fázi předem odhadnout, že počet pólů - $2p$ navrhovaného motoru bude vyšší než u běžně používaných konstrukcí strojů.

Pro další konstrukční řešení tedy budeme uvažovat mnoha-pólový stroj ($2p = 10 \div 20$) a odtud se odvíjející problematiku řešení.

- *Jmenovitý výkon motoru:* $P = 60 \text{ kW}$
- *Jmenovité otáčky motoru:* $n = 1200 \text{ min}^{-1}$, $n_{MAX} = 2500 \text{ min}^{-1}$
- *Jmenovité napájecí napětí:* $U_1 = 300 \text{ V}$

Z výše uvedených parametrů vypočteme mechanický moment na hřídeli stroje - M_k a dále příkon motoru - P_1 a jmenovitý proud statoru I_1

$$M_k = \frac{P}{\omega} = \frac{P}{2\pi \cdot n} = \frac{60000}{2\pi \cdot \frac{1200}{60}} = \underline{478 \text{ Nm}} \quad (2.7)$$

Předpokládáme dále, že záběrný moment stroje - M_z by se měl pohybovat ve velikosti $M_z = 750 \text{ Nm}$, pak pro momentovou přetížitelnost platí:

$$\varepsilon_M = \frac{M_z}{M_k} = \frac{750}{480} = \underline{1,57} \quad (2.8)$$

Při výpočtu příkonu stroje je potřeba odhadnout velikost účinníku a výsledné účinnosti stroje. Obvyklá hodnota účinníku se u synchronních strojů pohybuje v rozmezí $0,85 \div 0,9$, účinnost je obvykle dosti vysoká a dosahuje i 98%, u středně výkonných strojů je potřeba uvažovat s hodnotou nižší.

Pak pro velikost jmenovité hodnoty proudu I_1 platí:

$$I_1 = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_1 \cdot \cos\varphi \cdot \eta} = \frac{60000}{\sqrt{3} \cdot 300 \cdot 0,9 \cdot 0,9} = \underline{142,6A} \quad (2.9)$$

Pokud uvažujeme, že vinutí stroje bude zapojeno do Y pak tento proud - I_1 odpovídá proudu v každé fázi vinutí statoru.

Volíme dále počet pólů stroje. Protože výstupní kroutící moment na hřídeli – M_k má být relativně velký, je rozumné při konstrukci motoru uvažovat s variantou mnohapólového stroje. Zvolíme tedy $2p = 20$ -ti pólový stroj.

Synchronní otáčky pro napájecí frekvenci – $f = 50\text{Hz}$ pak vypočteme dle známého vztahu:

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{10} = \underline{300 \text{ ot/min}} \quad (2.10)$$

Pro dosažení jmenovitých otáček motoru 1200ot/min které odpovídají přibližně dálniční rychlosti 130km/hod s obutím 255/30 R19 je potřeba pro napájení motoru využít frekvenčního měniče. Jmenovitá napájecí frekvence:

$$f_1 = \frac{p \cdot n}{60} = \frac{10 \cdot 1200}{60} = 200 \text{ Hz} \quad (2.11)$$

Tím máme základní hodnoty určeny a můžeme přejít k návrhu základních rozměrů axiálního motoru.

Určení základních parametrů motoru, definice vztahů

Při výpočtu základních geometrických a konstrukčních rozměrů axiálního stroje se vychází z výstupního výkonu na hřídeli a s ohledem na následující předpoklady: [9]

- Elektrické a magnetické zatížení stroje je známo
- Počet vodičů na fázi – N_1
- Proud tekoucí jednou fází – I_a (odpovídá proudu I_1 při zapojení vinutí statoru do Y)
- Elektromotorická síla EMF na fázi – E_f

Základní vztah pro elektromotorickou sílu – E_f indukovanou ve statorovém vinutí lze určit ze základního Faradayova zákona (W. Wang, 2016). S ohledem na konstrukci rotačního stroje a zavedením počtu závitů a činitele vinutí je pak velikost magnetického toku – Φ , který se v magnetickém obvodu stroje uzavírá, rozhodující pro velikost EMF (GIERAS, 2004):

$$E_f = \pi \cdot \sqrt{2} \cdot n_s \cdot p \cdot N_1 \cdot k_w \cdot \phi_f = \frac{\pi}{4} \cdot \sqrt{2} \cdot n_s \cdot N_1 \cdot k_w \cdot B_{mg} \cdot D_{OUT}^2 \cdot (1 - k_d^2) \quad (2.12)$$

Zavádíme poměr k_d , který určuje vzájemný vztah mezi vnějším průměrem rotoru – D_{OUT} a vnitřním průměrem rotoru – D_{IN} :

$$k_d = \frac{D_{IN}}{D_{OUT}} \quad (2.13)$$

a dále činitel – k_D , reprezentující závislost – k_D ve vztahu pro určení vnějšího průměru rotoru – D_{OUT} s ohledem na zdánlivý elektromagnetický výkon:

$$k_D = \frac{1}{8} (1 + k_d)(1 - k_d^2) \quad (2.14)$$

Lineární proudová hustota – A_m , která udává proudové zatížení (doporučené) po obvodu statoru, je definována závislostí (Gieras, 2004):

$$A = \frac{4 \cdot \sqrt{2} \cdot m_1 \cdot I_a \cdot N_1}{\pi \cdot D_{OUT} \cdot (1 + k_d)} \quad (2.15)$$

kde: m_1 je počet fází statorového vinutí ($m_1 = 3$), pak zdánlivý elektromagnetický výkon – S_{elm} vypočteme (Gieras, 2004):

$$S_{elm} = \pi^2 \cdot k_D \cdot k_w \cdot n_s \cdot B_{mg} \cdot A_m \cdot D_{OUT}^3 \quad (2.16)$$

Zavedením vztahu mezi činným výstupním výkonem – P_{OUT} a zdánlivým elektromagnetickým výkonem – S_{elm} získáme následující závislost v podobě (Gieras, 2004):

$$S_{elm} = \epsilon \frac{P_{OUT}}{\eta \cdot \cos \varphi} \quad (2.17)$$

Pro motory platí, že $\epsilon < 1$, neboť vychází ze vztahu, kdy vnitřní elektromagnetická síla EMF musí být u motorů menší než vstupní napájecí napětí U_1 :

$$\epsilon = \frac{E_f}{U_1} \quad (2.18)$$

Složením výše uvedených vztahů, lze pro určení vnějšího průměru rotoru použít následující vztah (Gieras, 2004):

$$D_{OUT} = \sqrt[3]{\frac{\epsilon \cdot P_{OUT}}{\pi^2 \cdot k_D \cdot k_w \cdot n_S \cdot B_{mg} \cdot A_m \cdot \eta \cdot \cos\varphi}} \quad (2.19)$$

Jak je patrné, je rozměr vnějšího průměru rotoru – D_{OUT} závislý na 3tí odmocnině výstupního výkonu – P_{OUT} , a tak bude velikost rotoru jen nepatrně narůstat se zvyšující se hodnotou výstupního výkonu. Podobně je i elektromagnetický moment v závislosti 3tí mocniny vnějšího průměru rotoru a jeho velikost lze určit následovně (Gieras, 2004):

$$T_d = \frac{P_{elm}}{2\pi \cdot n_s} = \frac{S_{elm} \cdot \cos\psi}{2\pi \cdot n_s} = \frac{\pi}{2} \cdot k_D \cdot k_w \cdot D_{OUT}^3 \cdot B_{mg} \cdot A_m \cdot \cos\psi \quad (2.20)$$

kde P_{elm} je činný elektromagnetický výkon a úhel ψ je úhel mezi satorovým proudem – I_a a elektromotorickou silou EMF – E_f .

V prvním přiblížení musíme některé proměnné uváděné v definovaných vztazích odhadnout, či použít doporučené hodnoty uváděné v literatuře. (Gieras, 2004)

6.3.6 Rozměrový výpočet axiálního elektromotoru

Mezi základní veličiny, které je potřeba v prvním návrhu zvolit patří:

- Hodnota mag. indukce ve vzduchové mezeře $B_{mg} = 0,65 \text{ T}$
- Činitel vinutí, $2p=20$, $Q=24$ $k_w = 0,933$
- Lineární proudová hustota $A = 50000 \div 80000 \text{ A/m}$
- Součin účinnosti a účíníku $\eta \cdot \cos \phi = 0,9$
- Poměr E_f / U_1 $\epsilon = 0,85$
- Počet pólů stroje $2p = 20$

Předpokládáme, že činitel $k_d = 0,64$, tedy že vnitřní průměr rotoru D_{IN} odpovídá 60% vnějšího průměru rotoru D_{OUT} . Pak činitel k_D vypočteme (Gieras, 2004):

$$k_D = \frac{1}{8}(1 + k_d)(1 - k_d^2) = \frac{1}{8}(1 + 0,64)(1 - 0,64^2) = \underline{0,121} \quad (2.21)$$

Pak vnější průměr rotoru (a tím i statoru) je roven (Gieras, 2004):

$$\begin{aligned} D_{OUT} &= \sqrt[3]{\frac{\epsilon \cdot P_{OUT}}{\pi^2 \cdot k_D \cdot k_w \cdot n_s \cdot B_{mg} \cdot A_m \cdot \eta \cdot \cos \phi}} \\ &= \sqrt[3]{\frac{0,85 \cdot 60000}{\pi^2 \cdot 0,121 \cdot 0,933 \cdot 20 \cdot 0,65 \cdot 80000 \cdot 0,9}} \\ &= \underline{0,370 \text{ m}} \end{aligned} \quad (2.22)$$

Z konstrukčního důvodu upravíme vnější průměr rotoru na $D_{OUT} = 0,315 \text{ m}$, vnitřní průměr rotoru pak bude D_{IN} :

$$D_{IN} = k_d \cdot D_{OUT} = 0,64 \cdot 0,315 = \underline{0,202 \text{ m}} \quad (2.23)$$

Střední pólová rozteč na rotoru:

$$\tau_R = \frac{0,5\pi \cdot (D_{IN} + D_{OUT})}{2p} = \frac{0,5\pi \cdot (0,2 + 0,315)}{20} = \underline{0,0404 \text{ m}} \quad (2.24)$$

Magnetický tok přes vzduchovou mezeru (Gieras, 2004):

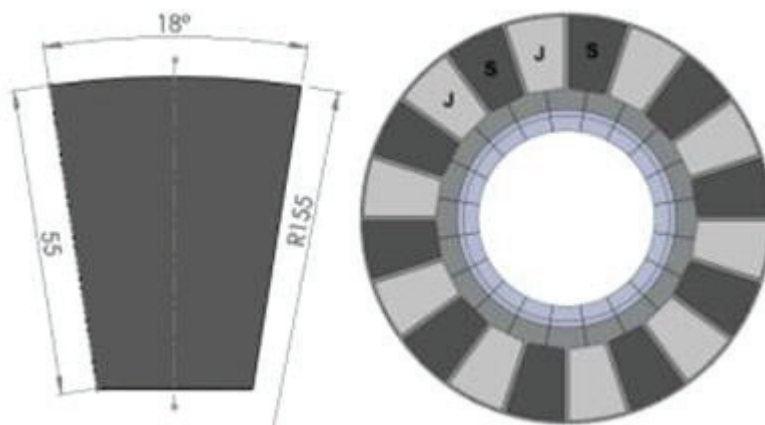
$$\begin{aligned} \phi_f &= \frac{2}{\pi} \cdot B_{mg} \cdot \frac{\pi}{8p} \cdot D_{OUT}^2 \cdot (1 - k_d^2) \\ &= \frac{2 \cdot 0,65 \cdot \pi}{\pi \cdot 8 \cdot 10} \cdot 0,3^2 \cdot (1 - 0,64^2) = \underline{0,00095 \text{ Wb}} \end{aligned} \quad (2.25)$$

V příslušné pólové rozteči rozmístíme po obvodu rotoru permanentní magnety, volíme pod magnety tloušťku rotorové kruhové desky tl_{DR} :

$$tl_{DR} = 6 \text{ mm} \quad (2.26)$$

Základní rozměry magnetu jsou:

$R_1 = 155 \text{ mm}$, $H = 55 \text{ mm}$, $\alpha = 18^\circ$, $tl_{MG} = 5 \text{ mm}$, Materiál NdFeB N42, viz Obr. 81.



Obr. 81 Základní rozměry magnetů a jejich rozmístění po obvodu rotoru, $2p = 20$

Návrh uspořádání statoru vychází z počtu pólů, které na něm budou umístěny a na těchto pólech bude uloženo statorové soustředné vinutí. Předpokládáme 3f napájení, $m = 3$.

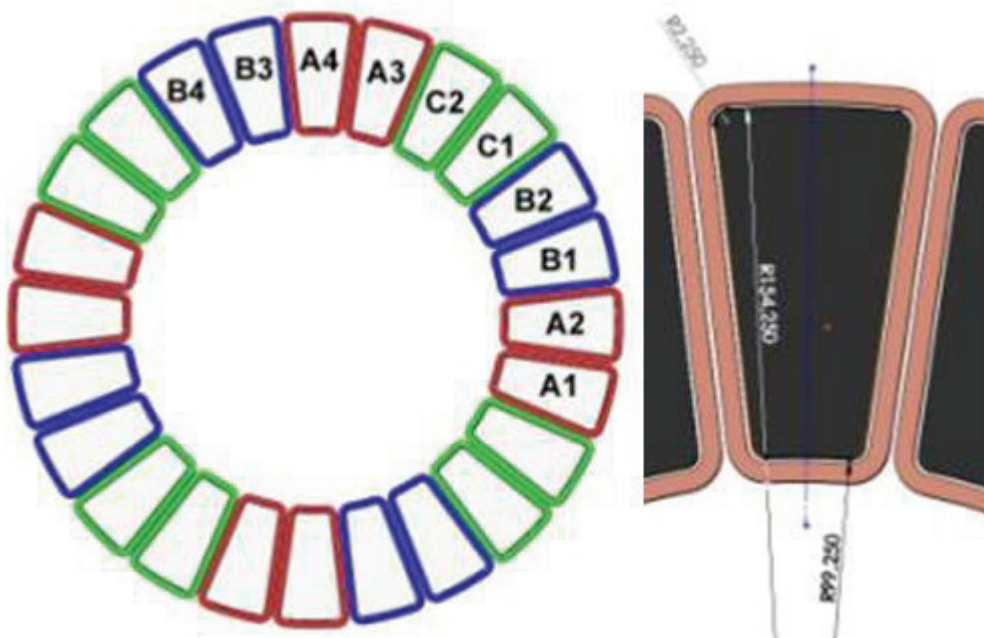
Počet drážek (pólů) statoru, volíme zlomkové vinutí při počtu drážek/pól/fázi - $q = 0,4$:

$$Q = 2p \cdot m \cdot q = 20 \cdot 3 \cdot 0,4 = \underline{24 \text{ dr(pólů)}} \quad (2.27)$$

Střední pólová rozteč na statoru:

$$\tau_s = \frac{0,5\pi \cdot (D_{IN} + D_{OUT})}{Q} = \frac{0,5\pi \cdot (0,2 + 0,315)}{24} = \underline{0,0337 \text{ m}} \quad (2.28)$$

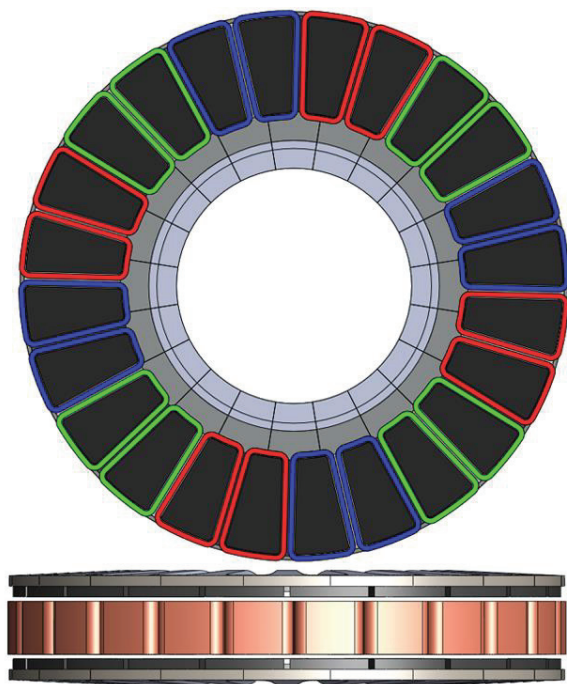
Na každé sousední dvojici pólů statoru bude uloženo vinutí příslušné fáze. Cívky příslušných fází A, B, C jsou zapojeny do série, smysl vinutí všech cívek na statoru je shodný. Označíme-li začátek cívky písmenem Z a konec cívky písmenem K, pak jsou cívky na statoru propojeny dle následujícího schéma: A1Z – A1K – A2K – A2Z – A3K – A3Z – A4Z – A4K – A5Z – A5K – A6K – A6Z – A7K – A7Z – A8K – A8Z. V obdobném duchu jsou zapojeny i cívky fází B a C, viz Obr. 82. Volba rozměrů statorových pólů vychází i z předpokladu umístění statorového vinutí.



Obr. 82 Rozložení vinutí na pólech statoru, $Q = 24$, $2p = 20$, $q = 0,5$ a rozměr pólu

6.3.7 Řešení magnetického pole axiálního stroje

Základní rozměrový návrh stroje provedeme pomocí CAD systému, ve kterém zachytíme všechny potřebné rozměry, viz Obr. 83. Vytvoříme tak základní geometrický model, který dále zpracujeme ve výpočetním software pracujícím na principu MKP.

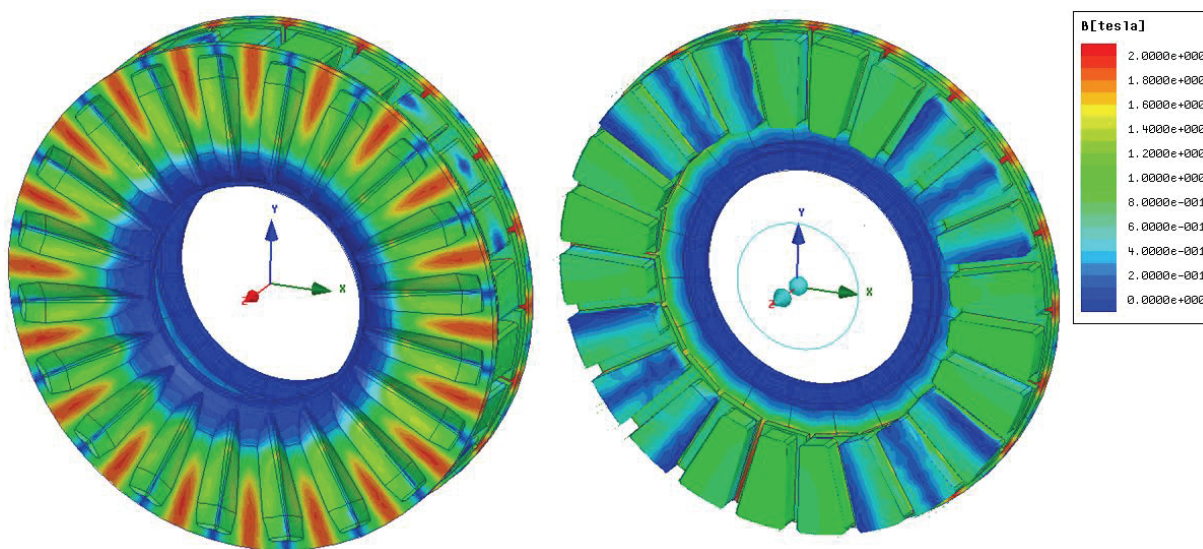


Obr. 83 Sestava axiálního motoru s dvojitým rotorem

Rozměrová geometrie je nahrazena konečnými prvky a dále provedena elektromagnetická analýza. Jako základní materiálové vlastnosti jsou použity charakteristiky uvedené na Obr. 72, Obr. 74 a Obr. 76.

6.3.8 Řešení magnetického pole ve stavu naprázdno

Řešením magnetického obvodu ve stavu naprázdno můžeme ověřit hodnoty magnetických veličin ve vzduchové mezeře stroje. Jde především o magnetický tok Φ a velikost magnetické indukce B_d .



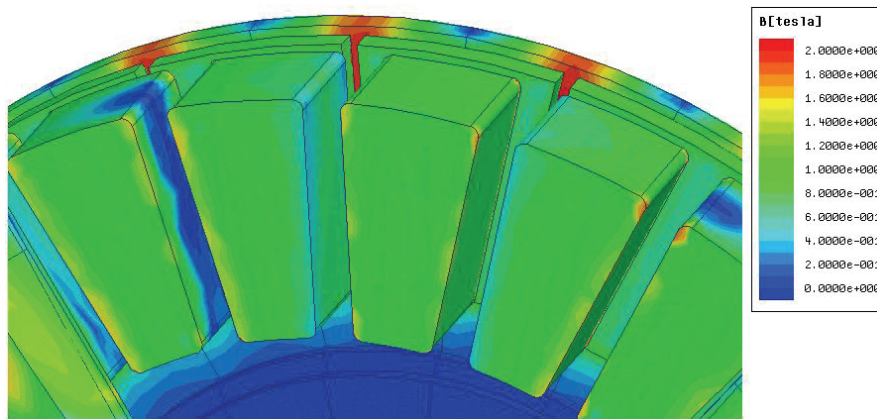
Obr. 84 Rozložení magnetického pole na stroji

Na Obr. 84 je vidět rozložení magnetické indukce ve stavu naprázdno, a to na celkovém modelu a dále v $\frac{1}{2}$ řezu přes póly statoru. Jak je patrné z tohoto obrázku, pole odpovídá 20-ti pólovému stroji.

V místech, kde po obvodu rotoru vzniká konstrukční mezera mezi jednotlivými póly sousedních magnetů, se projevuje vliv přesycení použitého materiálu. V těchto oblastech se uzavírá magnetický tok buzený oběma magnety a při optimalizačních výpočtech bude potřeba toto místo upravit navýšením tloušťky materiálu rotoru. Na druhou stranu si rovněž můžeme dovolit materiál odebrat, a to v místech osových symetrií magnetů (místa s minimální hodnotou magnetické indukce). Může tím dojít k podstatné úspoře hmotnosti rotoru.

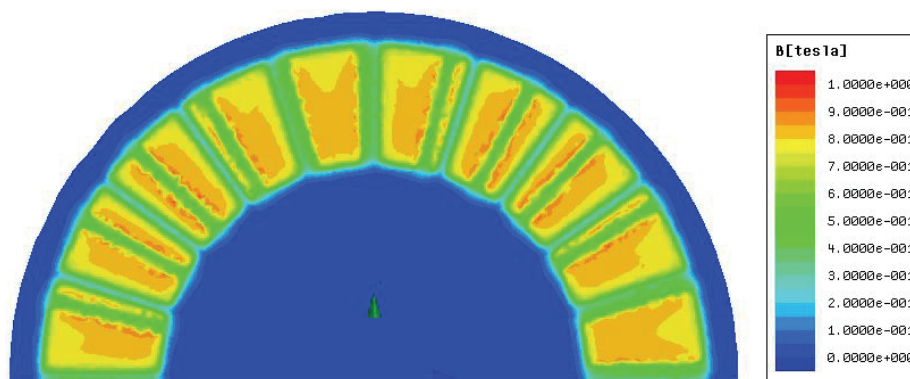
Pokud oblast pólů patřičně zvětšíme, pak můžeme výše uvedenou problematiku sycení materiálu sledovat detailněji na Obr. 85.

Díky zmenšujícímu se průřezu pólů statoru směrem k vnitřnímu průměru roste v těchto místech hodnota magnetické indukce a dosahuje velikosti cca $B_{Smax} = 1.2T$. Sycení pólů statoru po obvodu je střídavě rovnoměrné, jeden statorový pól leží vždy v celkovém zákrytu magnetu a sytí se více, což je dáno aktuální polohou budících magnetů ve vztahu k poloze statorových pólů.



Obr. 85 Rozložení magnetického pole na pólech stroje

Při čelním pohledu na budící póly rotoru v řezu přes střed vzduchové mezery vidíme, jakým způsobem dochází k uzavírání magnetického toku, viz Obr. 86.



Obr. 86 Rozložení magnetické indukce ve vzduchové mezeře na 1/10 řezu

Hodnota magnetické indukce ve vzduchové mezeře B_d dosahuje maxima cca $B_{dMAX} = 0,85$ T, což s ohledem na tvarový činitel průběhu pole přibližně odpovídá zvolené velikosti $B_{mg} = 0,65$ T při úvodním návrhu základních parametrů stroje. Magnetický tok, který se uzavírá přes pólovou rozteč budícího magnetu, získáme integrací magnetické indukce ve vzduchové mezeře přes plochu vymezenou pólovou roztečí magnetu a jeho mezními rozměry. Maximální hodnota toku se pohybuje ve velikosti $\Phi_{mg} = 0,00131$ Wb. Pokud nyní tento tok využijeme zpětně pro výpočet střední hodnoty magnetické indukce ve vzduchové mezeře, získáme velikost:

$$B = \frac{\phi_{mg}}{S_{PM}} = \frac{0,00131}{0,002028} = \underline{0,646 \text{ T}} \quad (2.29)$$

Což je hodnota opět velice blízká k uvažované velikosti B_{mg} při počátečním návrhu rozměrů stroje.

Při výpočtu počtu závitů v sérii pro jednu fázi N_s vyjdeme ze základní rovnice magnetického toku:

$$N_s = \frac{\epsilon \cdot U_{1f}}{\pi \cdot \sqrt{2} \cdot f \cdot k_w \cdot \phi_{mg}} = \frac{0,85 \cdot 173}{\pi \cdot \sqrt{2} \cdot 200 \cdot 0,933 \cdot 0,00131} = \underline{135 \text{ záv}} \quad (2.30)$$

Při počtu 8 cívek na fázi tedy vychází 16,9 závcívku. Z důvodů konstrukčních přidáme 1,1 závitů, a každá cívka tedy bude mít $N_{CVK} = 18$ závc. Celkový počet závitů v sérii na jednu fázi pak odpovídá: $N_s = 144$ závc. Doporučená proudová hustota ve vodiči $J_v = 5 \div 6 \text{ A/mm}^2$. Uvažujeme provedení vinutí s paralelním vodičem $a_w = 2$, pak průřez vodiče S_v pro vinutí cívek statoru vychází:

$$S_v = \frac{I_a}{a_w \cdot J_v} = \frac{143}{2 \cdot 6} = \underline{11,92 \text{ mm}^2} \quad (2.31)$$

Z konstrukčního hlediska umístění počtu závitů na póly statoru použijeme profilovaný vodič Cu 2,5×2,5 mm, průřezem $S_v = 5,25 \text{ mm}^2$. Pak proudová hustota ve vodiči naroste na hodnotu:

$$J_v = \frac{I_a}{a_w \cdot S_v} = \frac{143}{2 \cdot 5,25} = \underline{13,6 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}} \quad (2.32)$$

To je hodnota velmi vysoká a bude potřeba pro statorové cívky zajistit kapalinové chlazení. Odpor vinutí 1 fáze vypočteme ze střední délky závitů vinutí na cívce $l_s = 169 \text{ mm}$, průřezu vodiče S_v a vodivosti mědi při 40°C $\sigma_{Cu} = 50 \cdot 10^6 \text{ S/m}$, pak:

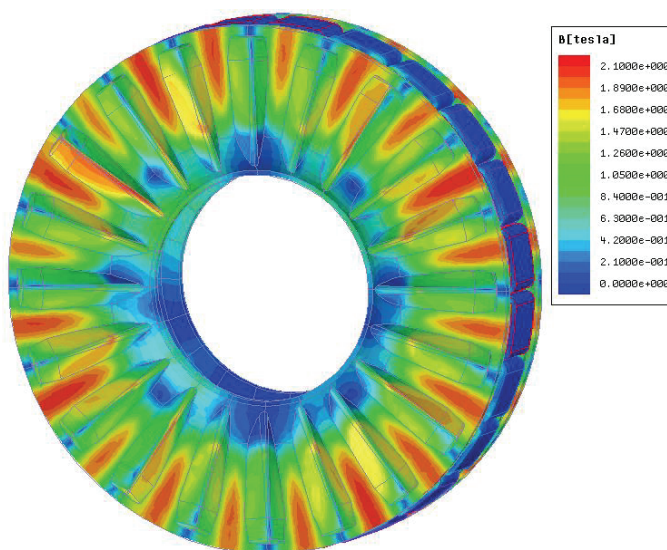
$$R_1 = \frac{N_1 \cdot l_s}{a_w \cdot \sigma_{Cu} \cdot S_v} = \frac{144 \cdot 0,170}{2 \cdot 40 \cdot 10^6 \cdot 5,25 \cdot 10^{-6}} = \underline{0,058 \Omega} \quad (2.33)$$

Ztráty ve vinutí všech 3 fází pak spočteme:

$$\Delta P_{Cu} = 3 \cdot I_a^2 \cdot R_1 = 3 \cdot 143^2 \cdot 0,058 = \underline{3595 \text{ W}} \quad (2.34)$$

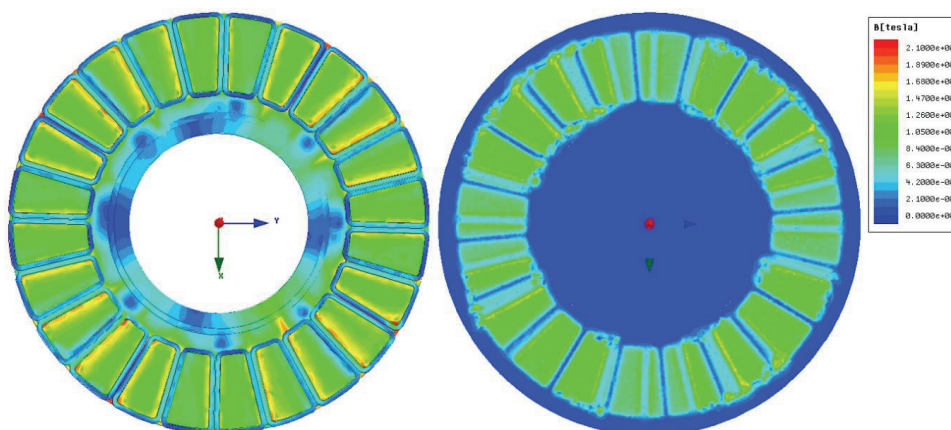
6.3.9 Výpočet momentové charakteristiky motoru

Při výpočtu momentové charakteristiky potřebujeme určit závislost mechanického momentu na úhlu natočení rotoru (zátěžný úhel - β). Postupujeme tak, že v cívkách statoru o počtu $N_{\text{CVK}} = 18$ záv uvažujeme tekoucí proud, který odpovídá jmenovité hodnotě proudu I_a a v každé příslušné fázi má hodnotu odpovídající časové ose napájecích proudů 3f proudů. Rotorem otáčíme o pólovou rozteč a v každé této poloze analyzujeme velikost elektromagnetického momentu ve vzduchové mezeře.



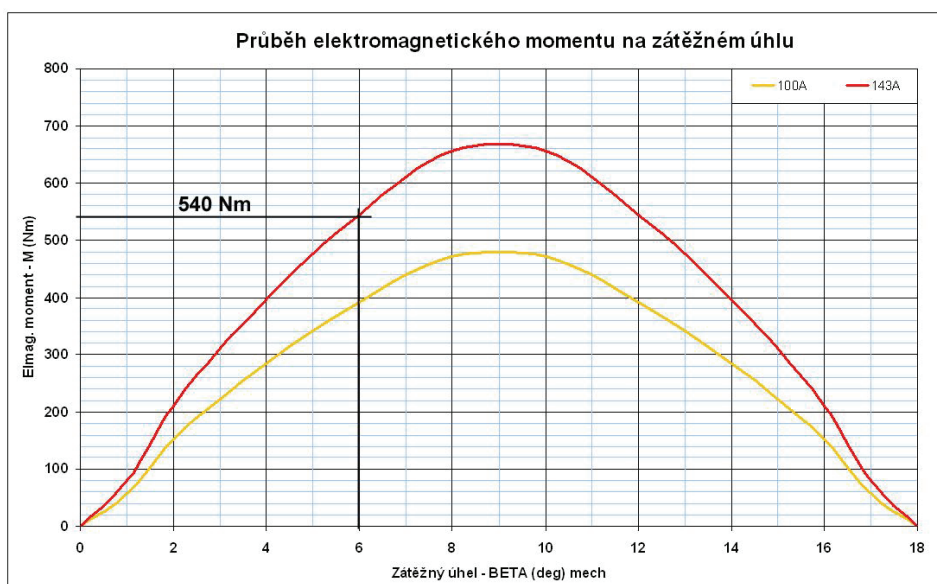
Obr. 87 Rozložení magnetické indukce na stroji při jmenovitém zatížení

Na Obr. 87 je vidět rozložení magnetické indukce na rotoru axiálního stroje při jmenovitém zatížení, na Obr. 88 pak rozložení magnetické indukce v řezu přes póly a ve vzduchové mezeře stroje.



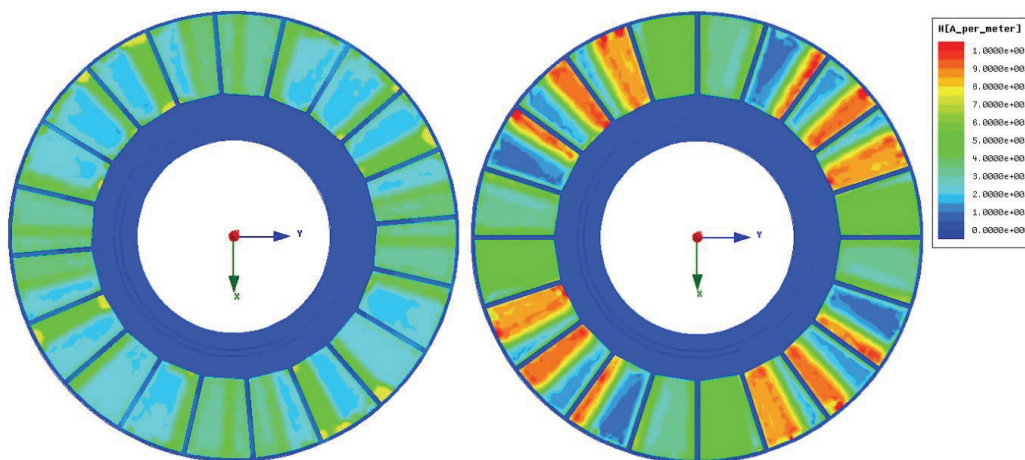
Obr. 88 Rozložení magnetické indukce na stroji, póly a vzduchová mezera

Hodnoty magnetické indukce se pohybují v max. hodnotě $B_{MAX} = 1,3T$ v pólech a to v místě jejich nejmenšího průřezu. Řešení závislosti momentu na úhlu natočení rotoru je výpočetní operací značně zdoluhavou, neboť zde již nelze zavádět symetrické podmínky jako v případě analýzy stroje naprázdno. Díky deformaci magnetického pole, způsobené reakcí kotvy, je potřeba řešit 3D elektromagnetický model stroje, a to v každém z úhlu natočení rotoru. Parametricky s ohledem na velikost proudu ve statoru pak lze jednotlivé křivky zachytit do výsledné charakteristiky momentu a zátěžného úhlu - β . Je potřeba sledovat, zda při otáčení rotoru nedochází k demagnetizaci permanentních magnetů vlivem statorového proudu ve vinutí.



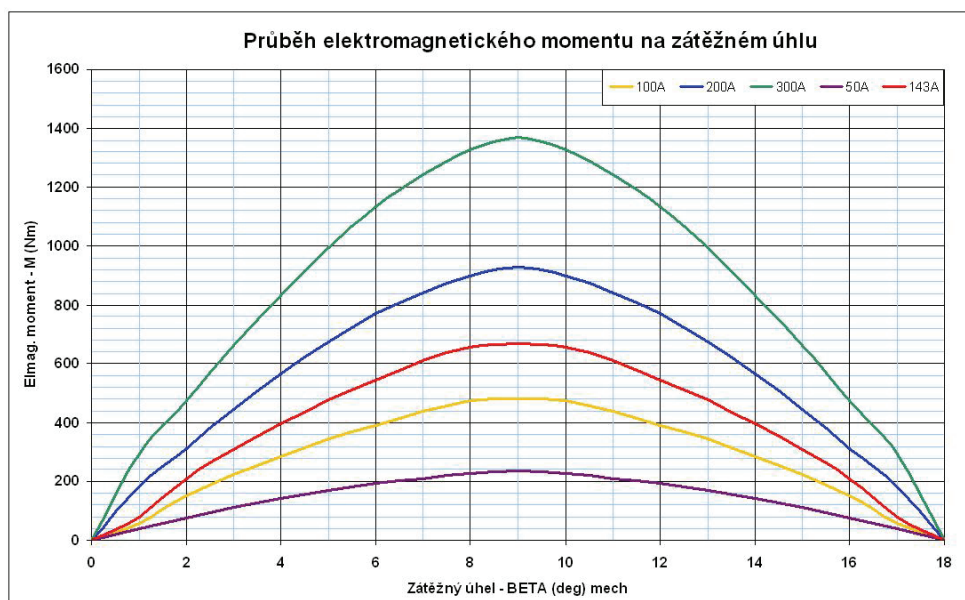
Obr. 89 Průběh momentu stroje v závislosti na natočení rotoru

Na Obr. 89 je vidět průběh elektromagnetického momentu vyvíjeného strojem při změně natočení rotoru. Červená křivka zobrazuje stav při jmenovité hodnotě proudu v cívkách statoru - $I_1 = 143$ A. Vlastní hodnota natočení je cca $\beta = 6$ deg, při němž stroj vyvíjí moment cca $M_{elm} = 540$ Nm. Tento moment je větší, než požadovaný moment na hřídeli, protože se jedná o vnitřní elektromagnetický moment. Požadovaná hodnota $M = 478$ Nm je splněna s dostatečnou rezervou. Žlutá křivka ukazuje průběh momentu při sníženém napájení, při proudu ve statoru $I_1 = 100$ A. Moment stroje je logicky menší. Pokud bychom nyní požadovali stejnou hodnotu momentu jako ve jmenovitém stavu stroje, překročili bychom nejen mez stability, ale potřebných hodnot bychom ani nedosáhli. Drobné zakřivení průběhu momentu je způsobeno lokálním sycením pólů statoru a uspořádáním magnetického obvodu, jinak by průběh momentu měl prakticky odpovídat stroji s hladkým rotorem (sinusový průběh momentu).



Obr. 90 Intenzita magnetického pole na povrchu magnetů rotoru

Na Obr. 90 je vidět rozložení intenzity magnetického pole ve jmenovitém stavu stroje a dále při napájení proudem $I = 300\text{A}$. Na pravém obrázku je patrný vliv demagnetizace již při úhlu natočení $\beta = 5\text{deg}$. Stroj tak dosahuje požadovaného momentu cca $M_{\text{MAX}} = 750\text{ Nm}$ při zátěžném úhlu nižším (cca $3,5\text{deg}$), viz Obr. 91. Polohu rotoru je potřeba kontrolovat čidlem k zamezení demagnetizace.



Obr. 91 Moment stroje v závislosti na natočení rotoru a velikosti napájecího proudu

6.3.10 Model motoru, výpočet hmotnosti součástí

Pro výpočet hmotnosti součástí využijeme výpočet hmotnosti z programu INVENTOR, ve kterém byl proveden rozměrový návrh motoru včetně výkresové dokumentace.

Rotor, materiál ocel

$$V_{\text{ROT}} = 0,000482 \text{ m}^3, \quad \rho = 7850 \text{ kg/m}^3, \quad m_{\text{ROT}} = 2 \cdot 3,78 = 7,56 \text{ kg}$$

Stator, materiál Somaloy

$$V_{\text{ST}} = 0,0000182 \text{ m}^3, \quad \rho = 7100 \text{ kg/m}^3, \quad m_{\text{ST}} = 24 \cdot 0,288 = 6,91 \text{ kg}$$

Magnety, materiál NdFeB

$$V_{\text{MG}} = 0,00001217 \text{ m}^3, \quad \rho = 7500 \text{ kg/m}^3, \quad m_{\text{MG}} = 40 \cdot 0,091 = 3,65 \text{ kg}$$

Vinutí, materiál měď:

$$V_{\text{Cu}} = 0,00001527 \text{ m}^3, \quad \rho = 8950 \text{ kg/m}^3, \quad m_{\text{Cu}} = 24 \cdot 0,137 = 3,28 \text{ kg}$$

Hmotnost aktivních částí stroje:

$$m_s = 21,40 \text{ kg}$$

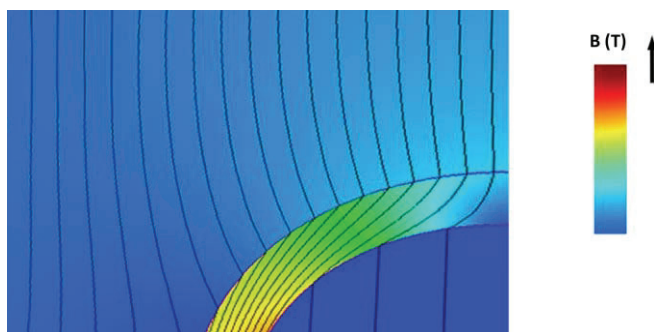
6.4 Analýza metodou konečných prvků (MKP)

Pro prvotní ověření, do jaké míry dochází v ložiskových deskách ke ztrátám, použijí metody konečných prvků. Díky této metodě bude možné potvrdit vznikající ztráty v deskách a odhadnout přibližnou míru pro určité okolní podmínky. Ověření bude vypočítáno pro materiál označovaný AL a X2CRNI18-9. Pro materiál EP GC 201 analýzu nebudeme provádět, jelikož v tomto materiálu by k magnetickým ztrátám docházet nemělo, u tohoto materiálu dochází pouze k dielektrickým ztrátám a ty by měly být ve vztahu k parametrům vstupních veličin zanedbatelné.

Při matematickém modelování elektromagnetických částí je nutné zaměřit se hlavně na elektromagnetické pole, tedy velikost a směr magnetického toku viz Obr. 92. K tomuto slouží různorodé numerické metody a postupy. Řešení spočívá v práci s modelem určitého fyzikálního

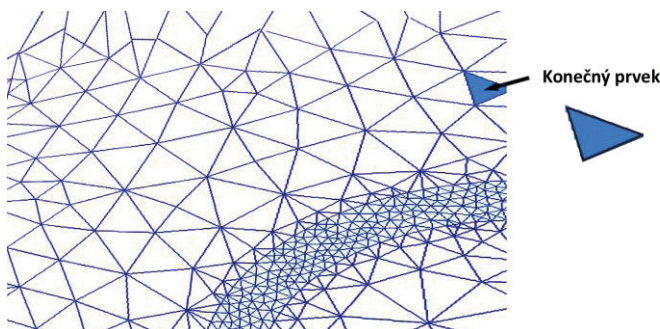
problému. Model se vytváří pomocí výpočetního softwaru. V něm také dochází k analýze a vyhodnocení.

Největší výhodou MKP procesu je v simulaci dějů a jevů, které se prakticky velice složitě a obtížně generují a mohou být velice finančně nákladné.



Obr. 92 Plošné řešení magnetického pole. (Teplý, 2011)

Základní myšlenka metody konečných prvků je založena na diskretizaci, tedy na reparaci spojitého prostředí systémem diskretních bodů (konečných prvků), ve kterých jsou soustředěny fyzikální kritéria popisující stav či vlastnosti příslušného bodu v celkovém modelu viz Obr. 93.



Obr. 93 Sít' konečných prvků v plošném zobrazení. (Zureks, 2007)

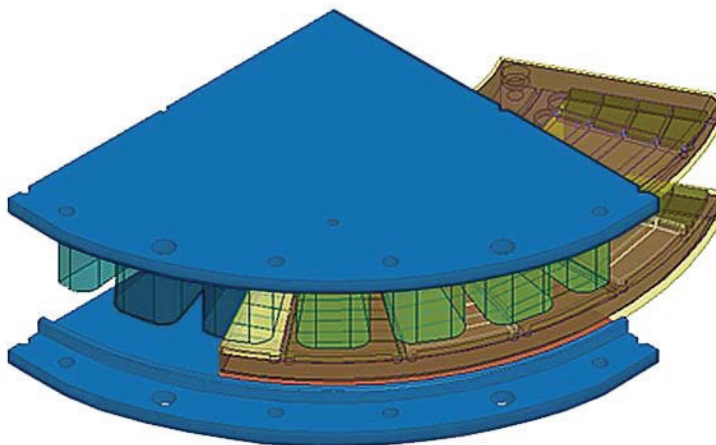
Při studiu fyzikálních jevů se tímto krokem zpravidla převede nutnost řešit složité diferenciální rovnice na řešení obecných diferenciálních nebo algebraických rovnic. Diskretizací oblasti modelu vznikne oblast jednoduchého tvaru, kterou nazýváme konečným prvkem. Tyto prvky mohou mít různé tvary, nejčastěji se jedná o čtyřstěn, pětistěn nebo šestistěn. V každém takovém prvku je popsána veličina parciální rovnicí. Sestavením do soustavy rovnic a jejím vyřešením se získávají uzlové hodnoty. (Martin Fusek, 2011)

Body řešení MKP:

- *Diskretizace modelu.*
- *Vyjádření chování jednotlivých konečných prvků.*
- *Kompletace výsledné soustavy rovnic.*
- *Aplikace počátečních nebo okrajových podmínek.*
- *Získání výsledků.*

6.4.1 Optimalizace 3D modelu pro výpočet MKP

Přesný model motoru pro výpočet nelze použít, neboť při síťování objektu je důležitá jednoduchost. Pokud je model složitý, každá překážka a složitost komplikuje výpočet rapidním zvyšováním počtu konečných prvků a tedy i rozšiřováním soustavy rovnic. Řešení rovnic je výpočetně velice náročné a jsou pro to potřebné obrovské výpočetní výkony. Také proto byl prováděn výpočet pouze na čtvrtinovém modelu axiálního motoru viz Obr. 94.

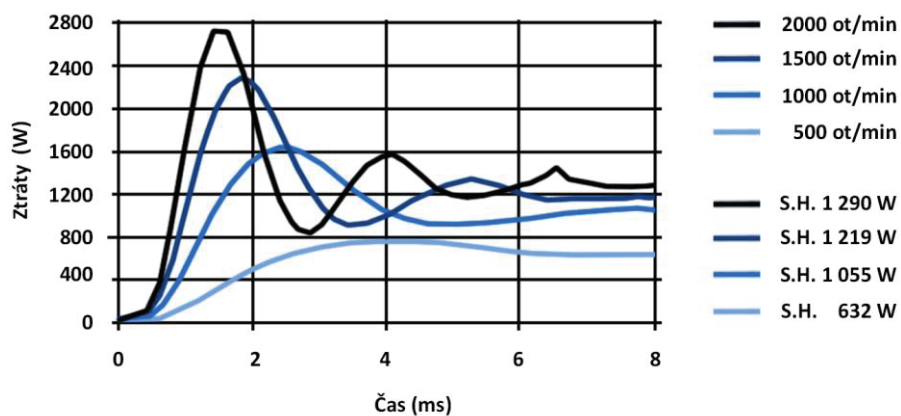


Obr. 94 Čtvrtinový výřez modelu motoru pro výpočet ztrát.

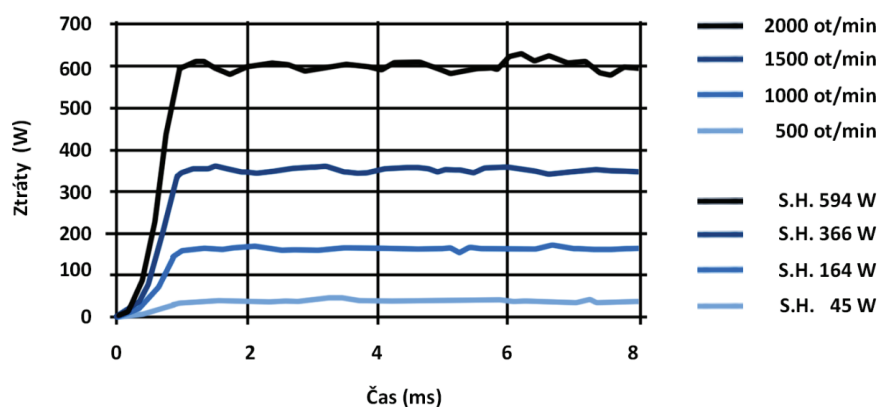
6.4.2 Vypočítané ztráty v ložiskových deskách metodou MKP

Ze simulace procesu průběhu velikosti magnetické indukce za chodu stroje vyplynuly dvě charakteristiky. Závislost ztrát v ložiskových deskách k závislosti na otáčkách motoru. Grafy byly

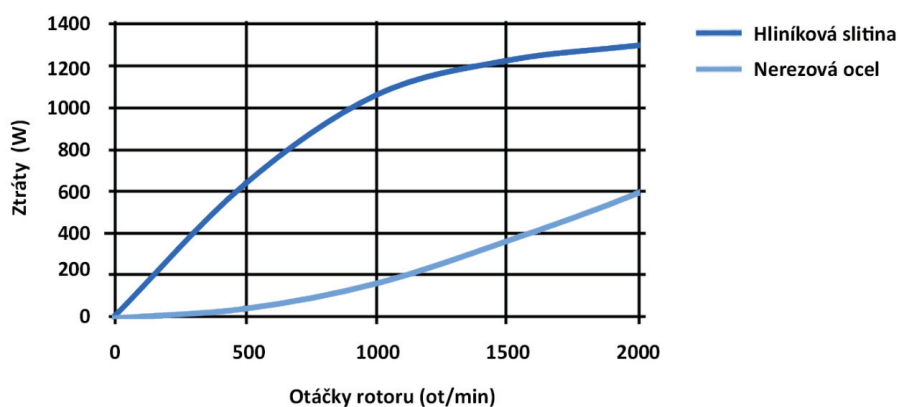
generovány pro hliník a pro nerezovou ocel. Oba materiály mají různý průběh ztrát v materiálu na čase.



Obr. 95 Ztráty v hliníkových ložiskových deskách v závislosti na otáčkách rotoru



Obr. 96 Ztráty v ložiskových deskách z nerezové ocele v závislosti na otáčkách rotoru



Obr. 97 Závislost ztrát v ložiskových deskách na otáčkách motoru

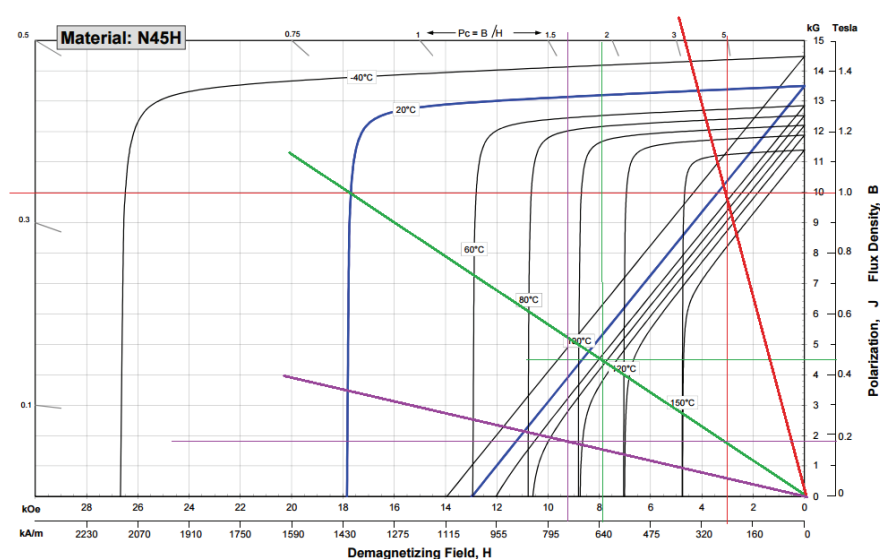
6.5 Výroba motoru pro testování

Výroba motoru se zakládala z volby materiálů, zvolení vhodného obráběcího postupu, z důvodů silných přitažlivých sil permanentních magnetů ze vzácných zemin bylo nutné obezřetně zvolit postupy osazování rotorů permanentními magnety a sestavování rotorů do celku. Největší výzvou při výrobě prototypu však bylo všeobecné využití chemického lepení součástí, kdy bylo nutné zohlednit chemickou zátěž na materiály, přesné zaměření součástí při lepení a časový limit pro manipulaci. Lepeny zde byly permanentní magnety, cívky i samotný stator.

6.5.1 Volba materiálů a technologií

Magnety

Ve výběru dodavatele byla zohledněna především cena a dále také termín dodání magnetů. Vítězným dodavatelem se stala firma Magnety s.r.o., která zajistila výrobu u svého spolupracujícího čínského dodavatele. Byl zvolen materiál N45H (Obr. 98) s ohledem na teplotní odolnost až do 180°C a jen lehce horší magnetické parametry oproti materiálu N48. Požadavek na vysokou teplotu vzešel jednak z potřebných rezerv při chodu motoru a dále také z technologie lepení, kdy je pro přichycení magnetů použito teplem vytvrditelné lepidlo (viz sekce Lepidlo). Povrch magnetů je proti korozi ošetřen epoxidovým lakem. Tato ochrana je levnější než běžné niklování, přináší navíc výhodu v nižších ztrátách vířivými proudy, způsobenými polem statoru.

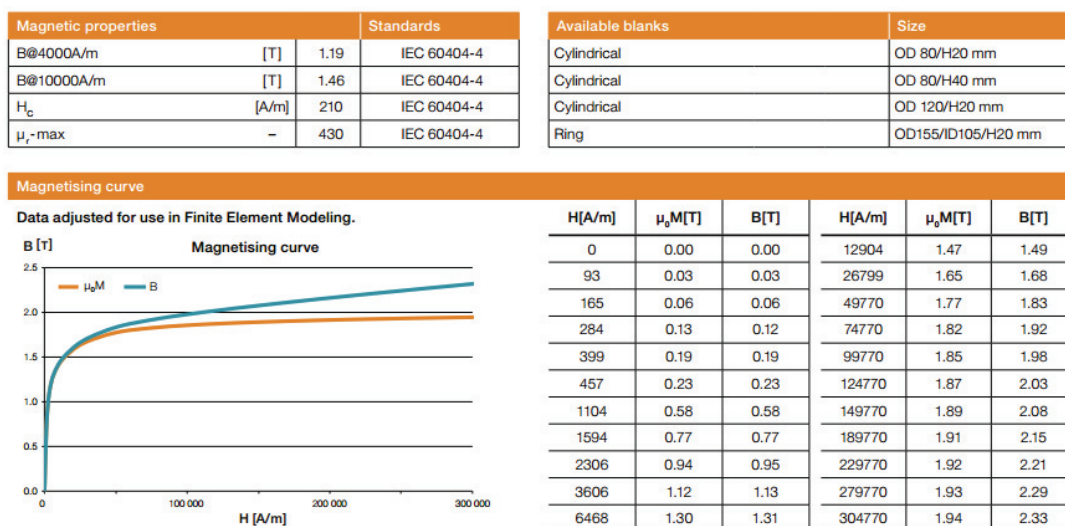


Obr. 98 Demagnetizační křivka materiálu N45H (Sphere, 2010)

Nevýhodou epoxidového laku je nižší mechanická odolnost vrstvy. Tento nedostatek je ošetřen technologií zalepení magnetů, během které dojde k jejich celkovému zalití a tím se vytvoří nová, robustnější antikorozi ochrana.

Somaloy

Póly statoru jsou vyrobeny z magneticky měkkého materiálu. Byl vybrán materiál od společnosti Höganäs. Tato nabízí pro malosériovou výrobu materiál nazvaný Somaloy Prototyping Materiall ve tvaru puku o průměru 80mm a výšce 40mm, což je také výchozí rozměr pro výrobu statorového pólu třískovým obráběním. Parametry použitého materiálu jsou uvedeny v tabulce.



Obr. 99 Parametry a dostupné rozměry materiálu pólů (AB, 2016)

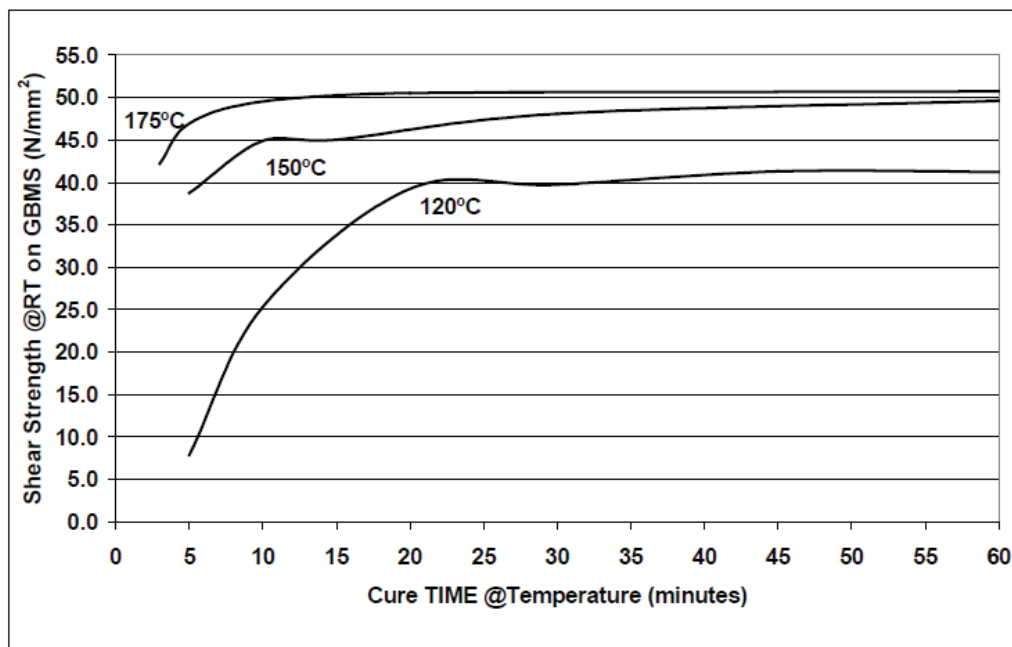
Drát statoru

Pro navíjení byl zvolen lakovaný drát o rozměru mědi 1,8mm x 2,8mm. Izolace měděného vodiče odpovídá teplotní třídě H. Vypočtená potřeba drátu je 2,4m na jeden statorový pól s rezervou na propojení. Drát dodala společnost PZK Brno a.s.

Chemická kotva

Magnety jsou na povrchu rotorů přichyceny lepením. Těleso statoru je tvořeno póly statoru s vinutím, které jsou přilepeny ke sklolaminátovým deskám. Tyto jsou na vnějším obvodu přilepeny k hliníkovému plášti motoru, na vnitřním jsou spojeny laminátovým kroužkem.

Veškeré pevnostní lepené spoje jsou vytvořeny jednosložkovým epoxidovým lepidlem Loctite Hysol 9394. Toto lepidlo je výrobcem doporučeno pro lepení magnetů, kovových částí, laminátů a dalších materiálů. Vykazuje vysokou chemickou odolnost a dále odolnost proti loupání. Pracovní teplota lepidla je až 200°C, což je dostatečná rezerva pro uvažované použití. Vytvrzení lepidla se dosahuje zahřátím na 120-170°C po dobu 60 minut. Z tohoto důvodu je mimo jiné nutné použít na rotoru magnety s vysokou teplotní odolností. Stejným lepidlem je vytvořena i dodatečná izolace pájených spojů uvnitř statoru.

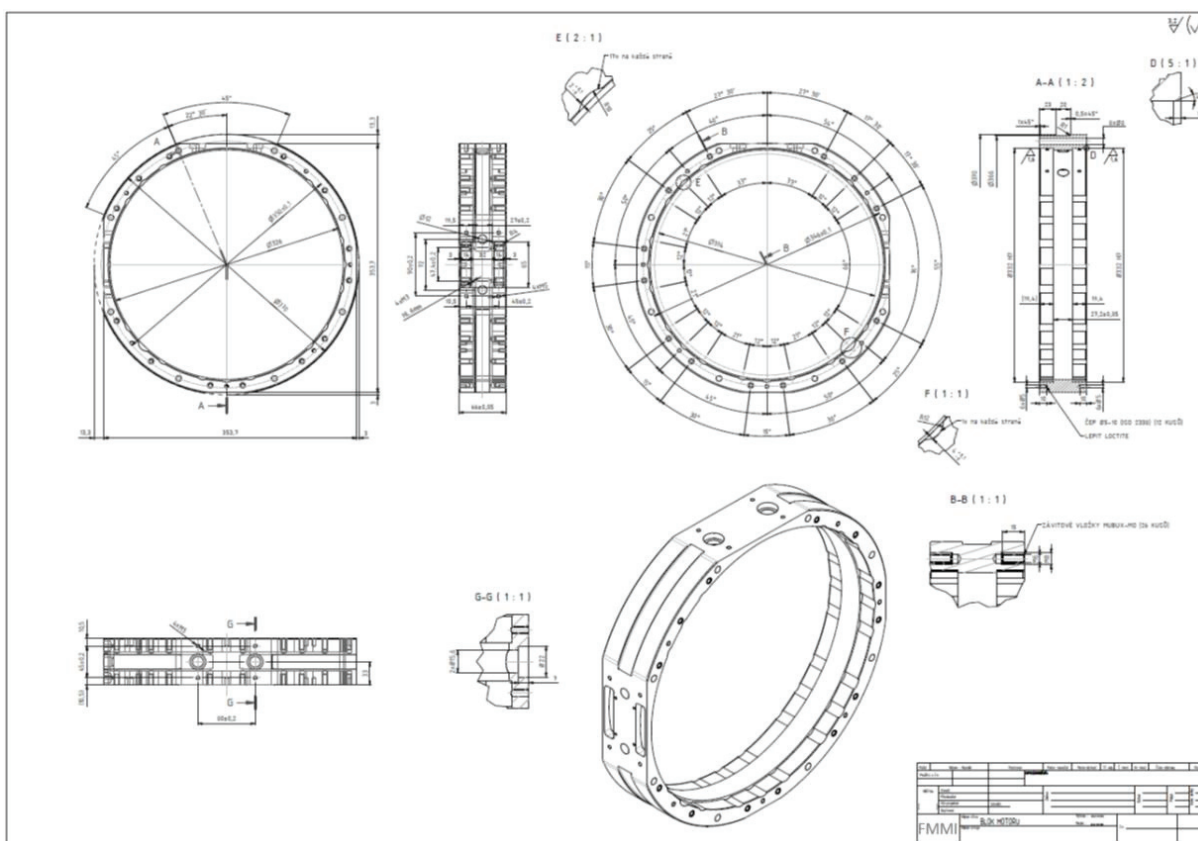


Obr. 100 Závislost smykového napětí na podmínkách vytvrzení lepidla Loctite Hysol 9394 (Aerospace, 2013)

6.5.2 Výroba jednotlivých částí

Obráběné díly

Motor se skládá převážně z obráběných dílů. K obrábění byly použity přesné CNC soustruhy a frézy, aby byly dodrženy výkresem stanovené přesnosti a předešlo se možným komplikacím při kompletaci motoru. Pro některé díly byla použita technologie laserového vypalování (nerezové podložky a základní tvar rotorů). Hřídel, rotor a mezikus jsou tepelně zušlechtěny pro dosažení vyšší pevnosti materiálu. Mezi obráběné díly patří i sklotextitové tělo statoru. Obráběny byly všechny druhy navržených ložiskových desek. Každý typ materiálu bylo potřeba obrábět jinými reznými rychlostmi a bylo nutné použít různé druhy rezných kapalin. Výrobně nejsložitější obráběné díly jsou vnější těla statorů viz Obr. 101, která jsou tvarově velice složité a bylo nutné vyrobit doprovodné přípravky pro uchycení na pěti-osé obráběcí centrum.



Obr. 101 Obráběná statorová část v čelním a bočním pohledu

Navíjení cívek statoru

Na základě několika dílčích zkoušek byla nakonec zvolena metoda ručního navíjení, kdy se ploché vodiče navíjí přímo na statorový pól. Tento pól je fixován speciálním přípravkem tak, aby byla navíjecí rovina horizontální. Konstrukce přípravku současně umožňuje volný pohyb osoby kolem celého obvodu pólu. Tato osoba může tedy obě ruce využít pro navádění a tvarování drátu na pól a vlastní váhu pro utažení drátu, aby bylo dosaženo požadovaného plnění. Protože drát (1,8mm x 2,8mm) je navíjen a ohýbán na menším rozměru (1,8mm), má snahu se položit. Z tohoto důvodu je nutné při navíjení vést drát přes přípravek s obdélníkovým otvorem, kterým lze docílit kontrolovaného ukládání drátu i při ohybu přes menší rozměr. Navinutý drát je provizorně fixován lepidlem Loctite 408 a následně PVC páskou proti povolení. Drát na pólu je dále tvarován za použití svěráku s plastovými čelistmi tak, aby drát na delší straně pólu přiléhal s minimální vůlí. Tímto tvarováním dojde také k uvolnění předtím utaženého návinu a navinutou cívku lze z pólu stáhnout. Póly i cívky jsou vždy číslovány, aby nedošlo k záměně a problémům při následné montáži viz Obr. 102. Každá cívka má 14 závitů. Tento počet byl dán rozměrem statorového pólu a drátu.



Obr. 102 Náhled na navinutou statorovou cívku

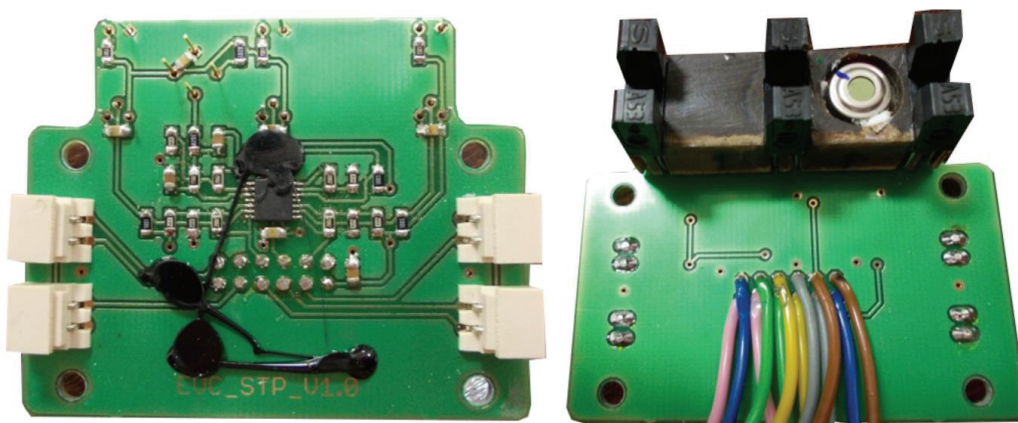
Elektronické obvody

Elektronickými obvody se zde rozumí elektronika umístěná na těle motoru. Zajišťuje snímání polohy rotoru pro řízení komutace a dále zajišťuje měření teploty jak statoru, tak rotoru.

Poloha je snímána optickými závorami Sharp GP1A53HRJ00F viz Obr. 103 přímo na zubech jednoho z rotorů. Signály z optických závor jsou zesíleny a tvarovány rychlým operačním zesilovačem a dále jsou vyvedeny na konektor motoru.

Měření teploty statoru je realizováno čtyřmi teplotními senzory KTY84-130. Jednotlivé senzory jsou zalepeny mezi póly statoru tak, aby měly dobrý tepelný kontakt s vinutím. Rozmístění je asymetrické z důvodu snímání všech třech fází. Každé dva senzory mají jeden společný vývod a jejich signály nejsou na straně motoru nijak upravovány.

Měření teploty rotoru je provedeno bezkontaktním senzorem teploty Melexis MLX90614ESF. Toto je programovatelný sensor s rozsahem měřené teploty od -70°C do 380°C . Výstup sensoru lze konfigurovat jako signál PWM nebo SMBus. V této aplikaci se využívá signál PWM. Tento je veden přes dolní propust 2. řádu s operačním zesilovačem a dále vyveden na konektor motoru. Zapojení je uvedeno v Tabulka 16 a Tabulka 17.



Obr. 103 Vlevo osazený plošný spoj ze strany TOP, vpravo detail snímače polohy a IR teploměru



Zapojení konektorů:

Tabulka 16 Konektor K1, (panelový samec)

Číslo pinu	Barva vodiče	Význam
1	Růžová	+5V napájení
2	Zelená	SENS1
3	Žlutá	SENS2
4	Šedá	SENS3
5	Hnědá	INFRA
6	Modrá	Napájení GND
7	-	Nezapojen

Tabulka 17 Konektor K2, (panelová samice)

Číslo pinu	Barva vodiče	Význam
1	Růžová	teplotní senzor statoru 4
2	Zelená	společný vodič senzorů 3 a 4
3	Žlutá	teplotní senzor statoru 3
4	Šedá	teplotní senzor statoru 2
5	Hnědá	společný vodič senzorů 1 a 2
6	Modrá	teplotní senzor statoru 1
7	-	Nezapojen

6.5.3 Výroba statoru

Lepení pólů a cívek

Jako první krok bylo ověření rozměrů cívek na pólech složením bez lepidla. Tímto se potvrdila složitelnost statoru a bylo přistoupeno k samotnému spojování jednotlivých statorových částí. Nejprve bylo slepeno čelo statoru s póly. Během vytvrzování byly póly fixovány tak, aby se vždy zachovaly mezery pro vinutí. Následně byly na každý pól nalepeny příslušné cívky. Aby při další manipulaci nedocházelo k prohýbání sklolaminátového čela statoru, byly cívky slepeny k sobě. Tato fixace samozřejmě nesmí uzavírat průtok oleje mezi cívkami.

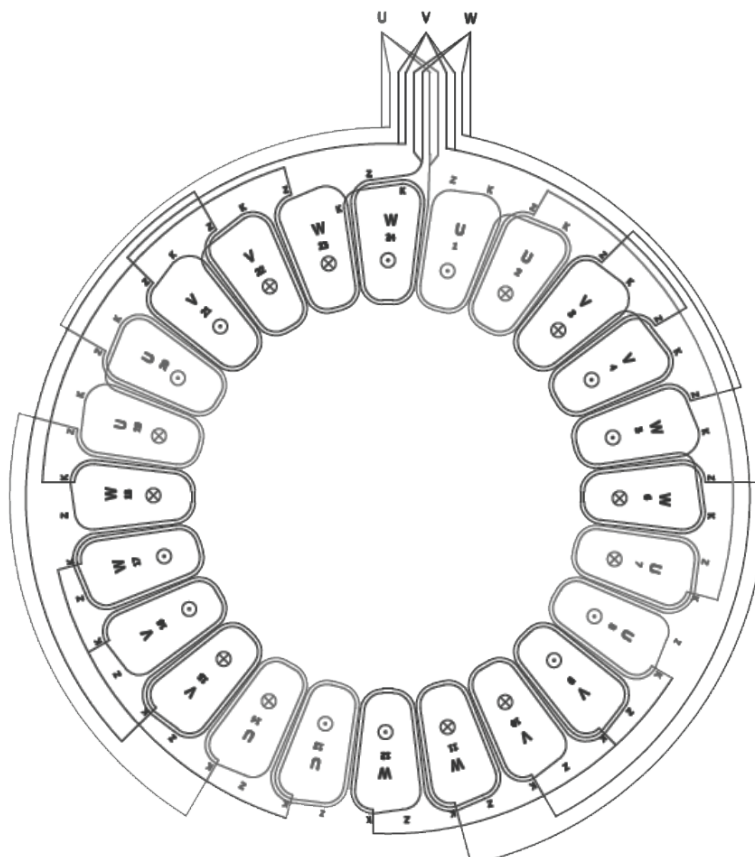


Obr. 104 Póly s cívkami na sklolaminátové desce statoru, zatím nezapojeny

Propojení cívek

Cívky statoru byly propojeny podle zapojovacího schématu. Celý stator je z elektrického hlediska rozdělen na dvě poloviny. V každé z těchto polovin je třífázové vinutí zapojené do hvězdy (Obr. 105). Pro snížení proudové hustoty ve vodiči bylo použito dvou drátů na jednu fázi v jedné polovině statoru. Každý z drátů vytváří magnetické pole na dvou pólech. Vlastní propojení cívek bylo provedeno pájením.

Mezi cívky statoru byly zalepeny čtyři teplotní senzory KTY84-130. Teplotní senzory byly vyvedeny lakovaným drátem 0,4mm.



Obr. 105 Zapojovací schéma statoru

Izolace

Lakovaný drát, kterým je motor navinut, má dostatečnou izolaci pro pracovní napětí vytvořenou dvouvrstvým lakem. Nicméně při navíjení a následné manipulaci došlo v několika místech k poškození této izolace. Z těchto důvodů byla poškozená místa zalepena epoxidovou pryskyřicí, aby nemohlo dojít ke zkratu mezi vinutími. Nejdůležitější bylo vytvoření izolace mezi vinutím a hliníkovým tělesem motoru. Tato izolace byla provedena dvěma vrstvami epoxidové pryskyřice, nanesené na vnitřní stěnu hliníkového tělesa a současně přilepením izolační polykarbonátové fólie tloušťky 0,25mm. Minimální požadovaná a splněná izolační pevnost je v tomto případě 2,5kV.

Uzavření statorového celku

Protože je uvažováno chlazení statoru olejem, musí být celé statorové těleso hermeticky těsné. Zapojené statorové vinutí s póly bylo vlepeno do sklotextitového tělesa statoru (Obr. 106). Dále byl zalepen vnitřní kroužek pro spojení statorových čel. Byly vytvořeny dělicí přepážky olejového chlazení. Jedním z problematických míst těsnění může být vyvedení teplotních senzorů a silových vodičů. Při konstrukci prototypu byly všechny elektrické přívody do statoru zality epoxidovou pryskyřicí. Při zalévání byl brán zřetel na to, aby nedošlo k zalití olejového kanálu uvnitř statoru. Takto připravený (z jedné strany stále otevřený) stator byl důkladně očištěn a propláchnut. Následovalo zalepení druhého sklolaminátového čela. Tímto vznikl tuhý, hermeticky těsný celek. Těsnost byla ověřena dlouhodobým přetlakem vzduchu na olejových vývodech.



Obr. 106 Stator s vlepenými cívkami

Montáž snímače polohy a kryt elektroniky

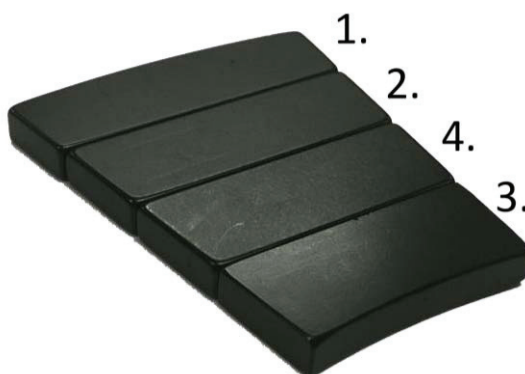
Optické závory a IR senzor byly zalepeny do své přesné polohy v držáku z pertinaxu. Tento následně osazen na DPS. Osazený plošný spoj elektronických obvodů byl přes distanční podložky přišroubován k bloku motoru. Tímto je pevně dána pozice optických závor vůči cívkám statoru a tedy i časování komutace. V případě nutnosti měnit toto časování je možné posunout celý pertinaxový držák nebo je nutné změnit jeho tvar a tím i pozici optických závor. Vyvedení signálů je provedeno jednotlivými vodiči na dva sedmipinové konektory. Tyto jsou označeny K1 a K2 a jsou umístěny na kratší straně plastového krytu elektroniky. Pro nemožnost záměny jsou opačně orientovány. Význam a zapojení konektorů je v odstavci Elektronické obvody. Na horní straně krytu uprostřed jsou mosazné šrouby M8 pro silové připojení k měniči.

6.5.4 Výroba rotoru

Rotační část motoru je složena z dílů Rotor levý, Rotor pravý, Hřídel a Mezikus. Pro spojení těchto dílů je použit běžný spojovací materiál jako pevnostní šrouby a kolíky.

Lepení magnetů

Díly Rotor levý a Rotor pravý jsou osazeny magnety ze vzácných zemin. Každý segment (segment je zde myšleno sestava 4 magnetů – viz obrázek) magnetu je zalepen do svého okna, ohraničeného zvýšeným materiálem rotoru. Tímto je zachycena především odstředivá síla při chodu motoru a také toto ohraničení umožňuje samotné vyskládání segmentu ze čtyř navzájem se odpuzujících magnetů bez použití speciálních technologií. Během ukládání segmentu se využívá skutečnost, že magnety se svou magnetickou silou přitahují k materiálu rotoru, ale současně se odpuzují, čímž dojde k jejich zapření v okně. Při praktickém lepení byl za nejvhodnější zvolen postup, kdy se uloží nejdříve největší magnet, přidá se k němu druhý největší, uloží se nejmenší magnet a nakonec druhý nejmenší magnet viz Obr. 107. Ukládání posledního magnetu je specifické, protože tento magnet musí při vkládání nejprve odtlačit druhý největší magnet a poté jej lze uložit do jeho pozice. Ve chvíli, kdy jsou všechny magnety segmentu v okně, je dobré je zajistit proti vyskočení. Toto zajištění je nutné především u prvních segmentů, kdy není vytvořena přitažlivá magnetická vazba na vedlejší neosazený segment. Ve chvíli, kdy je celý rotor osazen segmenty, je možné zajištění odebrat. Segmenty jsou dále zatřeny epoxidovou pryskyřicí i z horní strany, aby bylo zabráněno korozi magnetů. Při ukládání magnetů je nutno neustále kontrolovat jejich orientaci a pravidelné střídání segmentů. Též je nutné orientovat magnety druhého z rotorů tak, aby se při správné montáži přitahovaly.



Obr. 107 Postup vkládání magnetů do rotoru

6.5.5 Sestavení rotoru

Před kompletací celého motoru bylo nutné složit celek rotoru (Obr. 108). Toto bylo provedeno z důvodu ověření složitelnosti a dále pro vyvážení rotační hmoty. Samotné složení proběhlo bez vážných komplikací, protože se jednalo o sestavení přesně vyrobených dílů. Vyvážení proběhlo na horizontální vyvažovačce při otáčkách 2000ot/min. Potřebného vyvážení bylo dosaženo odvrtáním rotorů ze zadní strany tak, aby nebyl příliš narušen magnetický tok mezi sousedními segmenty (plytké díry na střed segmentu). Před demontáží byla zaznačena vzájemná pozice dílů pro pozdější montáž a zachování vyvážení.



Obr. 108 Sestavený rotor, patrná je vrstva epoxidu obklopující magnety

6.5.6 Kompletace motoru

Sestavení motoru začalo spojením Levého rotoru s Hřídelí. Na Rotor byla nasazena obě ložiska typ SKF7213BECBP. Toto bylo opatrně za pomoci ručního lisu vloženo do statoru a Přední kryt byl přišroubován k Bloku motoru. Dále byl za pomoci ručního lisu přiložen Pravý rotor a přišroubován k rotoru. Nasazením a dotažením Zadního krytu došlo k vymezení vůlí v ložiscích a také vzduchové mezery mezi statorem a rotory. Nyní bylo možné vyzkoušet chod motoru ručním pootočením. Tímto se zjistilo zadrhávání rotoru v určité oblasti. Po analýze opětovně rozebraného motoru byla zjištěna nesouměrnost při výrobě statoru. Tato byla následně eliminována zvětšením vzdálenosti rotorů o 0,5mm nerezovou podložkou. Po kompletaci se motor již volně otáčel. Byly namontovány olejové přívody. Do Hřídele byl přes spojovací kolíky vložen Mezikus a dotažen pojistným šroubem M20. Tímto krokem byla dokončena fáze sestavování motoru (Obr. 109).

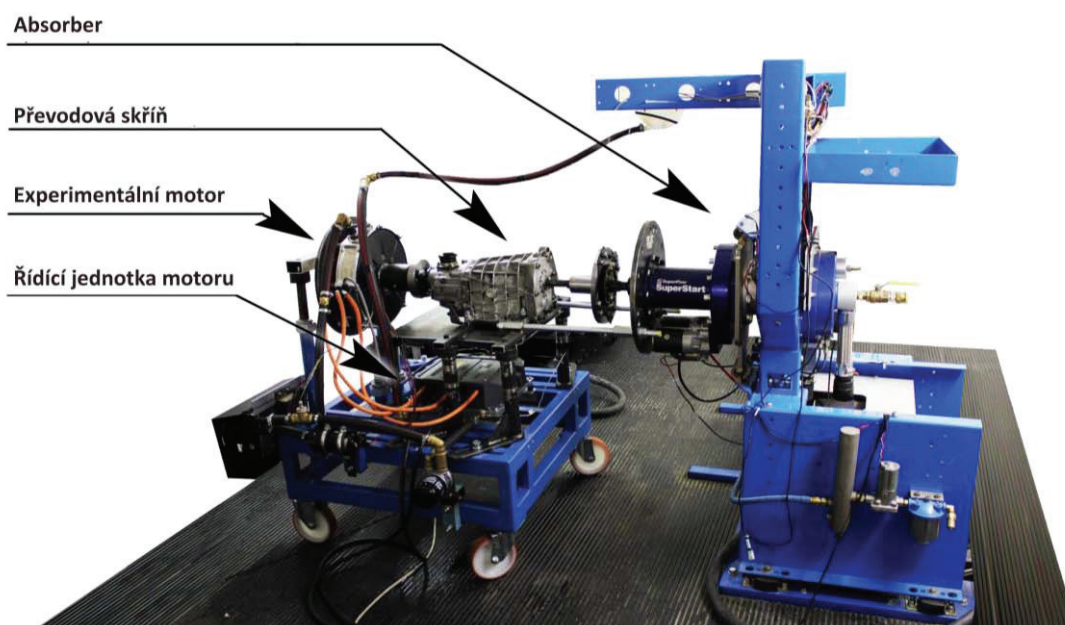


Obr. 109 Sestavený motor

7 Experimentální měření

7.1 Popis měřicí soustavy pro měření na motorové brzdě

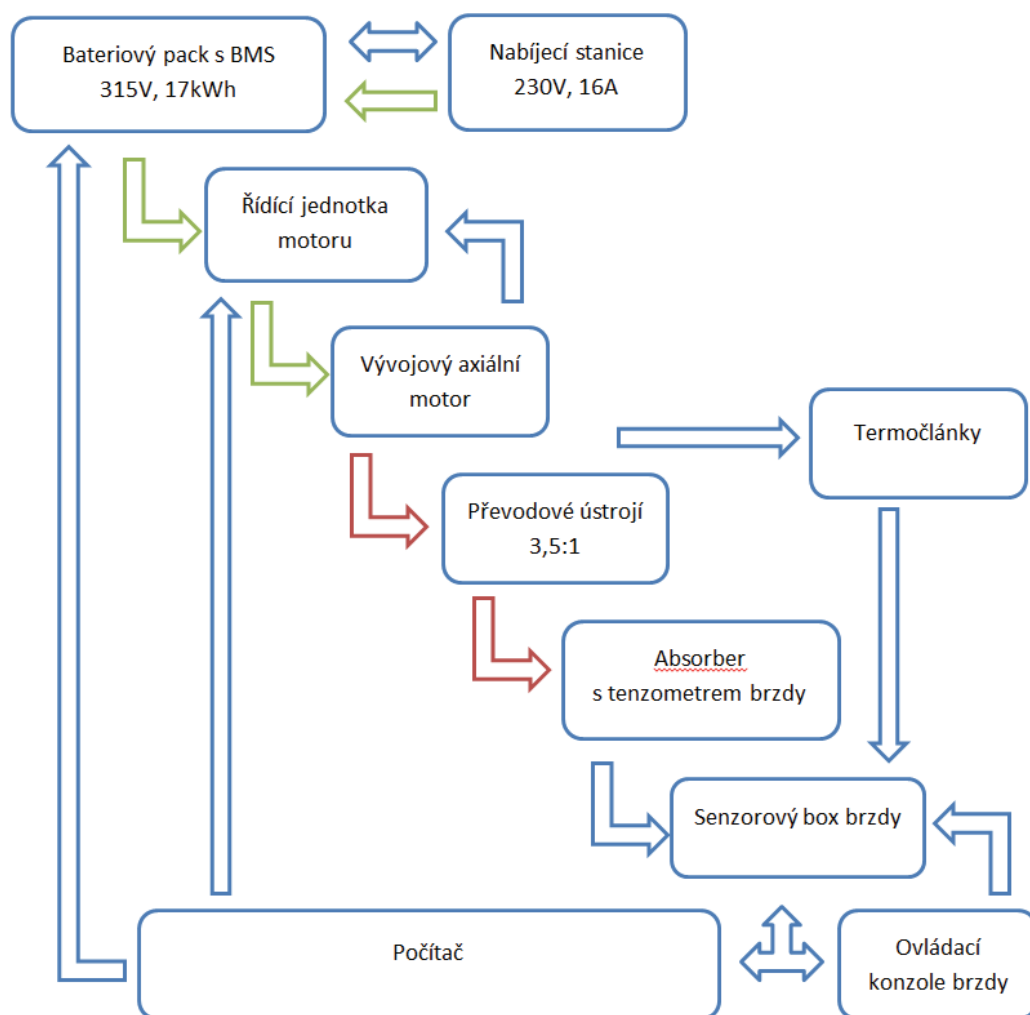
Měření budu provádět na experimentálním zařízení, které je popsáno v blokovém schématu na Obr. 111. Skládá se z hlavních částí a periferií. Jako hlavní zdroj elektrické energie slouží bateriový pack o kapacitě 17kWh a nominálním napětím 320V, baterie je složena z 300ks lithium polymerových bateriových článků (LiFePo4) zapojených serioparalelně. Články jsou krátkodobě proudově přetížitelné až do hodnoty 20C, kontinuální odběr do hodnoty 5C. Špičkově tedy tento zdroj může dodat až 1200A při napětí kolem 300V. O kontrolu jednotlivých článků proti přebíjení či podbití je v této soustavě zařazen tzv. Battery Management Systém (BMS), který v reálném čase kontroluje stav baterie. Pro nabíjení je k bateriovému packu připojena nabíjecí stanice řízená BMS systémem. Z bateriového packu je napojena řídicí jednotka motoru, která na základě požadavků kroutícího momentu od operátora a pomocí CAN rozhraní vytváří modulaci proudu pro pohon. Výstupní proud do fázových skupin v axiálním motoru má nosnou frekvenci 30 kHz a sinusový průběh vytváří pulzně šířkovou modulací. Samotný vývojový axiální motor je uchycen osmi pevnostními šrouby bez příruby, aby neovlivňovala měření teploty a nepodílela se na tvorbě magnetických ztrát. Na Obr. 110 je vidět konkrétní část sestavy experimentálního zařízení.



Obr. 110 Část sestavy experimentálního zařízení.

Motor je mechanicky napojen na převodové ústrojí předřazené absorbéru hydrodynamické brzdy. Převod do rychla je nutný pro možnost měření kroutícího momentu axiálního motoru od velmi nízkých otáček, je to z toho důvodu, že hydrodynamická brzda je primárně navržena na brždění větších momentů až od 1000 ot/min výš. Proto na výstupu z převodovky dosáhneme dříve brzdných otáček a dokážeme tento motor brzdit již od hranice 200 ot/min. (Čech, 2016)

Na těle absorbéru je umístěn tenzometr, který měří hladinu síly vyvolané na páce mezi absorbérem a pevnou základnou brzdy. Kromě tenzometru, potřebného k měření kroutícího momentu, je v tělese brzdy snímač otáček, tyto dva stěžejní parametry jsou snímány a zpracovávány v senzorovém boxu spolu s termočlánky pro měření teplot. V podobě digitálního signálu jsou veličiny zpracovávány v ovládací konzoli pro odečet a zpětné řízení akčních členů brzdy nebo paralelně zpracovávány pomocí programu WinDyn v počítači brzdy.



Obr. 111 Schéma experimentálního měřicího zařízení (červeně - mechanické spojení, modře - informační spojení, zeleně – trakční silové spojení)

7.1.1 Seznam použitých přístrojů

Motorová brzda SuperFlow SF-902

Popis zařízení:

- Zázemí motorové brzdy (kopka, ovládací stanoviště)
- Chladicí systém (nádrže, čerpadla, bypass, ventily, ovládání)
- Odvětrávací systém (odhlučňovací věže, oběh, izolace, ovládání)
- Vizualizace procesů (kamerový systém, záloha)
- Sensorový box (komunikace, senzory, ovládání, tlak, čidla teploty)
- Ovládací pult (displeje, ovládání)
- Počítačový systém pro vizualizaci a nastavení
- Dynamometr (Obr. 112):
 - Stojan motoru
 - Stojan absorbéru
 - Absorpční jednotka (servoventil, oběh vody)
 - Chladicí systém (výměna vody, regulace, měření tep.)
 - Senzory



Obr. 112 Motorová brzda SuperFlow SF-902 (ASSURICH, 2016)



Tabulka 18 Seznam měřených veličin motorové brzdy SF-902

Přímé	Nepřímé
Krouticí moment [Nm]	Výkon [kW]
Otáčky [Ot/min]	Zrychlení [RPM/s]
Servo-ventil [%]	Průtok paliva [g/s]
Teplota [°C]	Korekční faktor [-]
Tlak [kPa]	
Vlhkost [%]	
Objem vzduchu [l/s]	
Napětí baterie [V]	
Frekvence turbíny paliva [Hz]	

Nutné kalibrace:

- *Kalibrace tenzometru pro měření Nm*
- *Nastavení servo-ventilu*
- *Nulování hodnot senzorů*

Opakovatelnost měření ovlivňují:

- *Podmínky prostředí testu*
- *Akcelerační efekt*
- *Zpoždění měření (reakční doba, doba regulace, čas přenosu)*
- *Shodné nastavení a postup testů*
- *Shodné napětí battery packu*
- *Shodné počáteční teploty*

Měřicí počítač s měřicími a ovládacími softwary

Všechna potřebná data byla zaznamenávána do počítače motorové brzdy (Obr. 113), kde byly nainstalovány níže uvedené programy pro kontrolu a sběr dat ze senzorů motorové brzdy, řídicí jednotky motoru či bateriového packu.



Obr. 113 Počítač motorové brzdy ovládacím pultem

WinDyn 2.0

Jedná se o program dodávaný k ovládání a sběru dat motorové brzdy SF-902. Program podporuje nastavování profilových sestav pro různorodá měření, třeba námi vytvořený profil určený pro měření elektromotorů, kde je zohledněno dodatečné převodové ústrojí brzdy pro snížení minimálních brzdných otáček, zrušení korekce výkonu, kterým podléhají pouze spalovací motory nebo nastavení kalibrací a vizualizace aktuálních sledovaných veličin. Jak jsem uvedl, v tomto programu je možné provádět kalibrace, nastavovat limity, konfigurace akčních členů, programování postupu typizovaných zkoušek, či ukládání testů.

- *Nastavuje průběh testu*
- *Zobrazuje veličiny*
- *Vytváří průběhy z naměřených veličin*
- *Ukládá měřené veličiny a průběhy*
- *Kalibruje a nuluje senzory*
- *Limituje měření*

C6944 Shiroko Design Verification test Systém

Tímto softwarem počítač komunikuje s řídicí jednotkou motoru pomocí CAN rozhraní. Software nabízí dekodovat data z CAN rozhraní do podoby zpracovatelných dat, ale také nabízí ovládání řídicí jednotky, potažmo motoru, na základě vysílání požadavku na požadovaný kroutící moment. Pomocí tohoto rozhraní získáváme informace o teplotě řídicí jednotky, aktuálním proudu, napětí, momentu, otáčkách atd. Jako poslední funkce softwaru je možnost kalibrace polohových a teplotních senzorů motoru a nabízí také jistou bazální vnitřní diagnostiku řídicí jednotky a senzorů motoru. Tedy oznamuje detekované poruchy popisem problému.

EVC BMS monitor BT 1.0 BETA

Tento software je důležitým zobrazovacím a nastavovacím programem, pro kontrolu tzv. BMS, tedy systém managementu baterií. Programem lze definovat limity možností bateriového packu na základě nastavení maximálních odebíraných proudů, teplot, hloubky vybití či maximální napětí každé skupiny paralelně řazených článků. Po nastavení limitů v tomto programu pouze spouštíme trakční napětí, které je v případě překročení jakéhokoli limitu odpojeno, aby nedošlo k poškození baterií či následkům, způsobeným působením trakčního proudu.

Klešťový ampérmetr UNI-T UT 207

Jedná se o klešťový ampérmetr (Obr. 114) s rozsahem do 1000A pro střídavý i stejnosměrný proud. Tímto měřicím přístrojem jsme kalibrovali proudovou sondu LEM umístěnou v bateriovém packu.



Obr. 114 Klešťový ampérmetr UNI-T UT 207

Multimetr UNI-T UT70A

Tento digitální multimetr (Obr. 115) jsme použili ke kontrole a nepřímému měření proudu a také měření napětí v uzlových bodech. Multimetr byl používán také pro kalibrace teplotních čidel motoru.



Obr. 115 Multimetr UNI-T UT70A

Proudová sonda

Měření proudu bude prováděno pomocí proudové sondy LEM DHAB viz Obr. 116 se dvěma rozsahy. Rozsah $\pm 50\text{A}$ a rozsah -550A až 320A . Napájení sondy je 5V . Při měření využíváme oba možné rozsahy měření, jelikož do 50A je přesnost měření vyšší.



Obr. 116 proudové sondy LEM DHAB

Bezdotykový teploměr VA6530

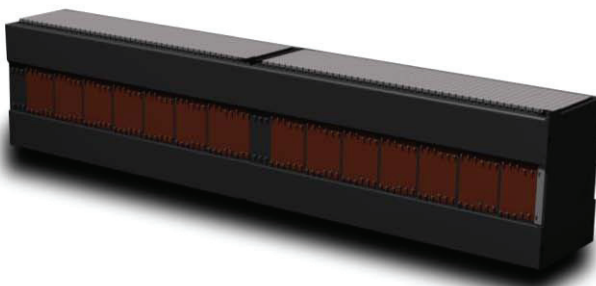
Bezdotykový teploměr (Obr. 117) byl používán pro ověřování hranic tepelného vyzařování pro detekci vhodného umístění termočlánků na ložiskové desky. Udávaná přesnost přístroje je $\pm 1^\circ\text{C}$, nicméně je změřená teplota závislá na odrazivosti materiálu, a proto jsme tento přístroj použili pouze pro orientační měření.



Obr. 117 VA6530 infrared thermometer

Bateriový pack

V našem konkrétním případě je bateriový pack samostatná jednotka (Obr. 118), ve které je instalován BMS, hlídač izolačního stavu, přednabíjení, silové stykače, jištění a nakonec samotné moduly, složené z konkrétních článků, tvořících baterii. Baterii tvoří celkem 300ks LiFePO₄ článků od firmy A123. Jednotlivé články jsou zapojeny serio - paralelně vždy 3ks článků paralelně a tato sestava dále sériově. Toto zapojení poskytuje jmenovité napětí 320V s vybíjecím proudem do 1000A. Pack má kapacitu 17 kWh. Doba nabíjení je v našich podmínkách (dáno příkonem přípojky v laboratoři J 001) kolem 5 hodin do plné kapacity, tento čas se může dále prodloužit o dobu balancování dle aktuálního stavu jednotlivých článků.



Obr. 118 Bateriový pack 320V - 17kWh

Řídící jednotka motoru

Pro řízení experimentálního axiálního motoru, jak jsem již uvedl v kapitole 6.3.5, jsme zvolili řídicí jednotku Sevcon Gen 4, pro její vhodné výstupní a řídicí parametry. V experimentální části ji využíváme také jako zdroj některých dat pro experiment.



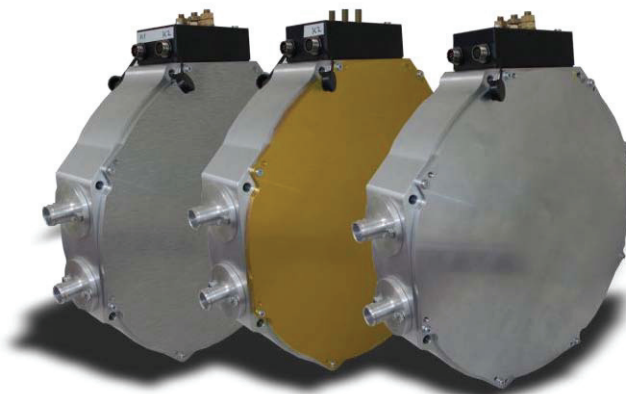
Obr. 119 Řídící jednotka motoru Sevcon Gen4 (Sevcon, 2012)

Jmenovité parametry:

- *Určeno pro synchronní motory s permanentními magnety.*
- *Napájecí napětí do 400VDC.*
- *Špičkový výkon 100 kW.*
- *Jmenovitý výkon 60 kW.*
- *Vektorové řízení momentu.*
- *Integrovaný logický obvod.*
- *Jmenovité napájecí napětí 12V nebo 24V*
- *Splňuje normu ISO26262 ASIL C*

Experimentální axiální motor

Experimentální motor má jmenovitý výkon 55 kW, maximální kroutící moment 450Nm a 1800ot/m. Tento motor byl při experimentech osazen třemi druhy materiálů a testován průběh oteplení ložiskových desek, průběh teploty vinutí motoru, průběh účinnosti vývojového motoru a průběh kroutícího momentu vývojového motoru s cílem potvrdit matematické analýzy a podložit je výsledky měření pro tyto tři zvolené materiály.



Obr. 120 Náhled testovaného motoru s ložiskovými deskami z leva XCr2Ni18-9, EP GC 201, AlCu4PbMgMn

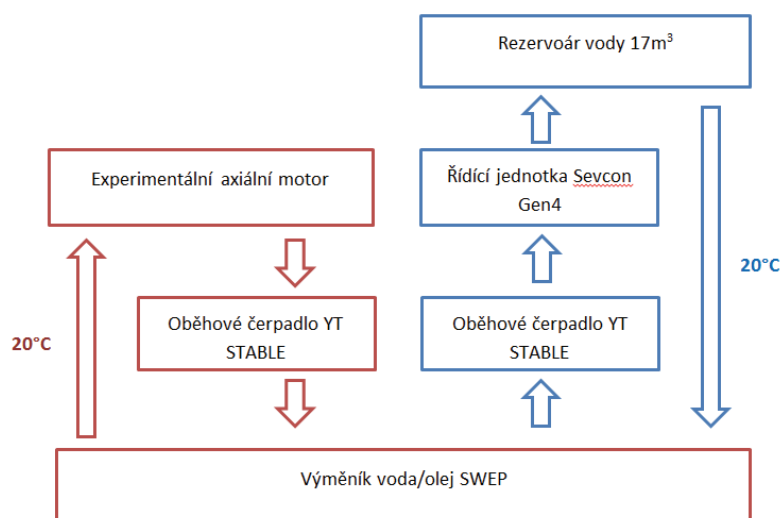
7.1.2 Instalace a zapojení experimentálního motoru na motorovou brzdu

Zapojení a instalace motorů na motorovou brzdu probíhá v několika částech. V první fázi bylo třeba vyrobit přípravky na uchycení experimentálního motoru, aby měření nenarušoval přenos tepla do uchycení motoru. Proto byla vytvořena základna o vysoké tuhosti a samotný motor nebyl přímo přišroubován k základně, ale odsazen 70mm od základny pomocí atypických šroubů viz Obr. 121. Tímto byla zajištěna dostatečná vzdálenost základny od ložiskové desky.



Obr. 121 Základna pro uchycení motoru na motorovou brzdu s odsazením

Další částí instalace byl chladicí okruh motoru, viz Obr. 122. Chladicí medium motoru je elektroizolační převodový olej Dexron VI ředěný olejem pro elektrojiskrové obrábění Castrol R40 v poměru 1:5. Tento poměr byl odzkoušen na řadě prototypových motorů a vybrán pro svou nižší viskozitu a lepší chladicí účinky než samotný Dexron VI (EN ISO 12185 a DIN ISO 3016) a také pro načervenalé zbarvení pro snadnou detekci hladiny či úniku.



Obr. 122 Schéma zapojení chladicího obvodu: červená - olejový chladicí okruh, modrá - vodní chladicí okruh

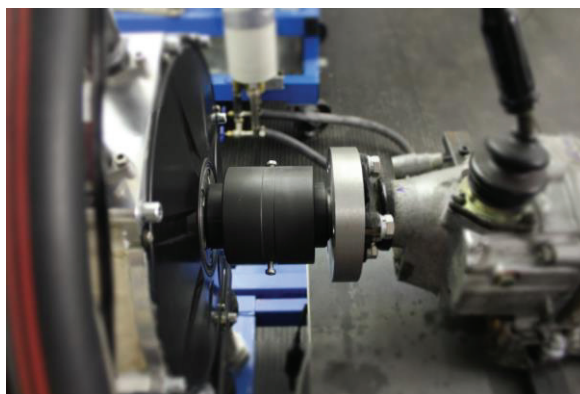
Velký rezervoár chladicí vody motorové brzdy SF-902 s objemem 17 m³ vody zajišťuje stabilní teplotní podmínky kolem 20°C. V průběhu měření tedy nedochází ke změně teploty chladicí kapaliny do měřicího okruhu, což je nezbytné pro zajištění přesnosti měření kroutícího momentu. Tato chladicí voda zároveň zajišťuje pomocí výměníku voda/olej viz Obr. 123, chlazení oleje pro motor tak, aby byla zajištěna konstantní vstupní teplota oleje do motoru. Zajištění stabilních teplotních podmínek vody pro brzdou a oleje pro motor je důležité pro porovnatelnost měření jednotlivých variant ložiskových desek z různých materiálů na experimentálním motoru.



Obr. 123 Výměník Voda/Olej značky SWEPE

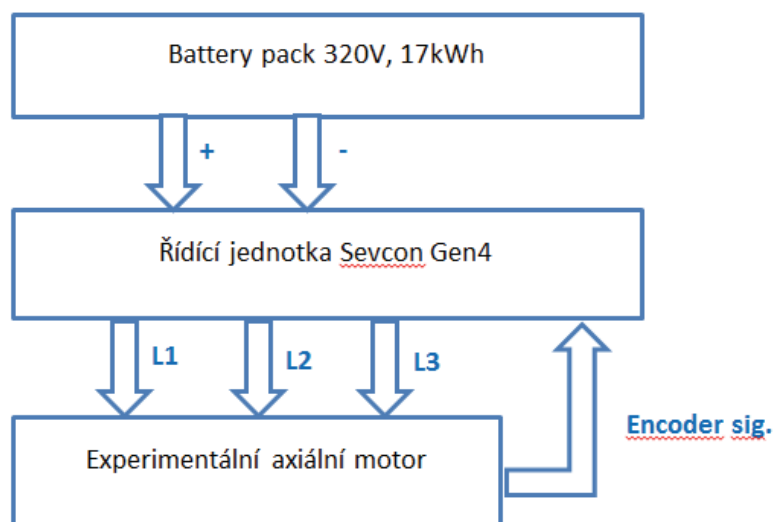
Chladicí olejový okruh koluje mezi motorem a výměníkem pomocí oběhového čerpadla a vytváří stabilní přísun chladného oleje do statoru motoru. Vodní okruh využívající rezervoár vody je propojen s výměníkem a řídicí jednotkou motoru. Oběhová čerpadla jsou v oběhu chladících medií umístěny tak, aby jejich obvyklé ohřívání kapalin neovlivňovala potřebnou konstantní teplotu pro motor.

Další částí instalace je spojení brzdy a motoru, motor nesmí být axiálně namáhán, a proto byla použita spojka, viz Obr. 124, která dovoluje volný pohyb v ose výstupní hřídele. Spojka je se vstupní a výstupní hřídelí zajištěna perovým spojem.



Obr. 124 Spojka zajišťující axiální pohyb

Elektrické silové zapojení pohonu je provedeno kabely Helukabel Single 602-RC-CY UL-CSA 1x35, mezi řídicí jednotkou a motorem jsou kabely stíněny. Schéma zapojení je uvedeno na Obr. 125. Prochází jimi rozfázovaný třífázový proud s nosnou frekvencí 30kHz, která by indukčně ovlivňovala ostatní měření v blízkém okolí.



Obr. 125 Schéma zapojení silové části měřícího zařízení

7.2 Popis měřicí soustavy pro ověřování v provozu elektromobilu

Z důvodu zvýšení použitelnosti vyvíjené metodiky testování materiálů pro konstrukční části elektromotoru bylo provedeno i ověření funkce experimentálních motorů při provozu samotného elektromobilu StudentCar SCX (Obr. 126). Níže uvádím Tabulka 19 s technickým popisem vozu pro zdokumentování měřicího zařízení.

Tabulka 19 Technická data elektromobilu StudentCar SCX

Název	StudentCar SCX
Typ	Elektromobil – dvoumístné sportovní kupé s přímým nezávislým pohonem všech kol.
Výkon	220 kW
Dojezd	180 km (podle režimu jízdy)
Zrychlení	4,9 sec 0-100 km/hod (9,2 sec 0-150 km/hod)
Hmotnost	1360 kg
Motor	4ks synchronní motor s axiál. magnetickým tokem a perm. mag. ze vzácných zemin
	Celkový maximální točivý moment 1800 Nm
	Maximální otáčky omezeny na 2000 ot/min
Baterie	300ks LiFePO4 s kapacitou 17 kWh a napětím 320V
Nosný rám	Příhradový samonosný ocelový
Karoserie	Kompozitová / fiberglass
Nápravy	Lichoběžníkové, hnané s nezávislým pohonem kol

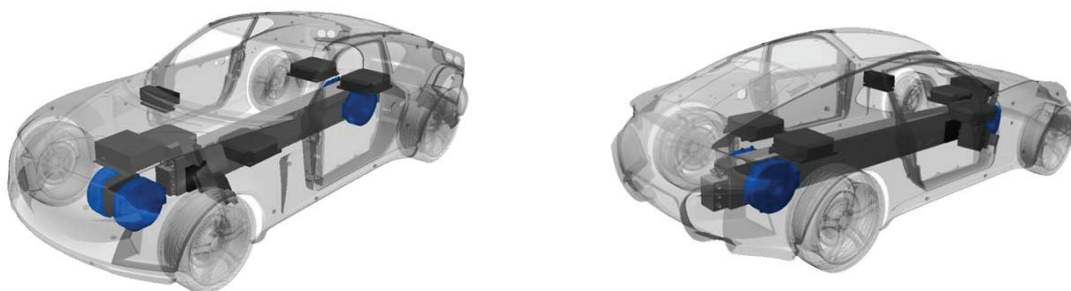


Obr. 126 StudentCar SCX

Měření bylo provedeno v několika režimech, které mohou při provozu nastat. Bylo provedeno měření pro městský provoz, kombinovaný provoz, dálniční provoz, maximální rychlost, akcelerační zrychlení a rekuperační brzdění. Tyto testy obsahují většinu fyzikálních stavů a dějů, které na brzdovém

stanovišti nelze simulovat. Bylo tedy nutné ověřit chování experimentálního motoru s vybranou variantou ložiskových desek také při provozu.

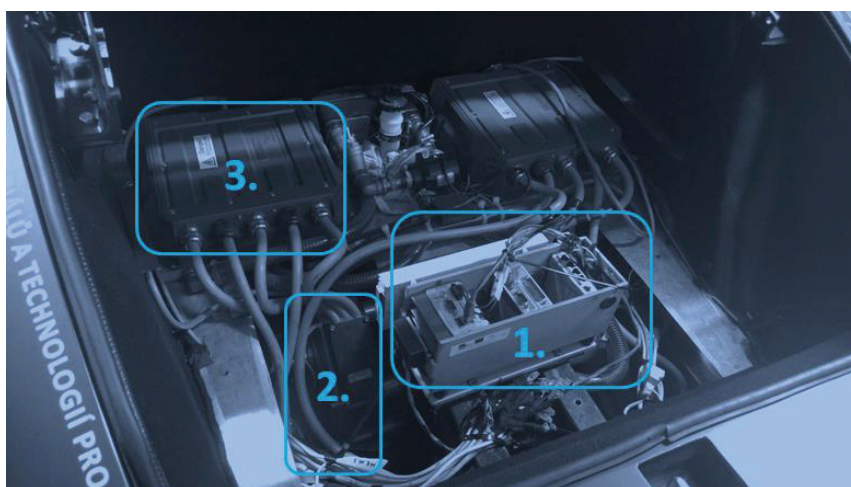
V celém průběhu vývoje experimentálního motoru bylo vyrobeno 14ks prototypů s různými alternacemi, nejvhodnější série 4ks motorů byla implementována do vozu a dlouhodobě testována. Níže uvádím konkrétní měření okrajových stavů vozu a chování teplotních parametrů motorů.



Obr. 127 Umístění axiálních motorů v elektromobilu

Měření probíhalo na testovacích plochách i v běžném provozu a současně na všech čtyřech motorech, umístěných v elektromobilu viz Obr. 127. V obrázku jsou motory zvýrazněny modrou barvou, blízko každého motoru jsou pak řídicí jednotky motorů, které jsou zvlášť pro každý motor a umístěné v blízké vzdálenosti kvůli rušení periferií přívodními kabely.

Výsledné grafy jsou uvedeny pro přehlednost pouze pro jeden motor z této čtveřice, konkrétně levý zadní motor viz Obr. 128.



Obr. 128 Popis měřicího zařízení v útroběch elektromobilu: 1 - Compact RIO pro sběr dat za jízdy, 2 – Axiální prototypový motor, 3 – Řídicí jednotka motoru Sevcon Gen 4.

Na obrázku, který je pohledem do odkrytovaného zadního úložného prostoru, můžeme vidět samotný motor s jeho řídicí jednotkou a měřicí a záznamové zařízení. Toto záznamové zařízení viz Obr. 129 je výkonný průmyslový počítač, osazený měřicími kartami pro sběr digitálních i analogových signálů. Kromě měření toto cRIO zastává naprogramovanou komunikaci mezi řídicími jednotkami, zajišťuje řízení stabilizačního systému, pohon vozu a mnoho dalších zástupných řídicích procesů.



Obr. 129 National Instruments cRIO

Ověření probíhalo v několika zkouškách, část byla prováděna v běžném provozu, dynamické testy na uzavřené trati polygonu Tatra Kopřivnice.

8 Výsledky měření

8.1 Výsledky měření na motorové brzdě

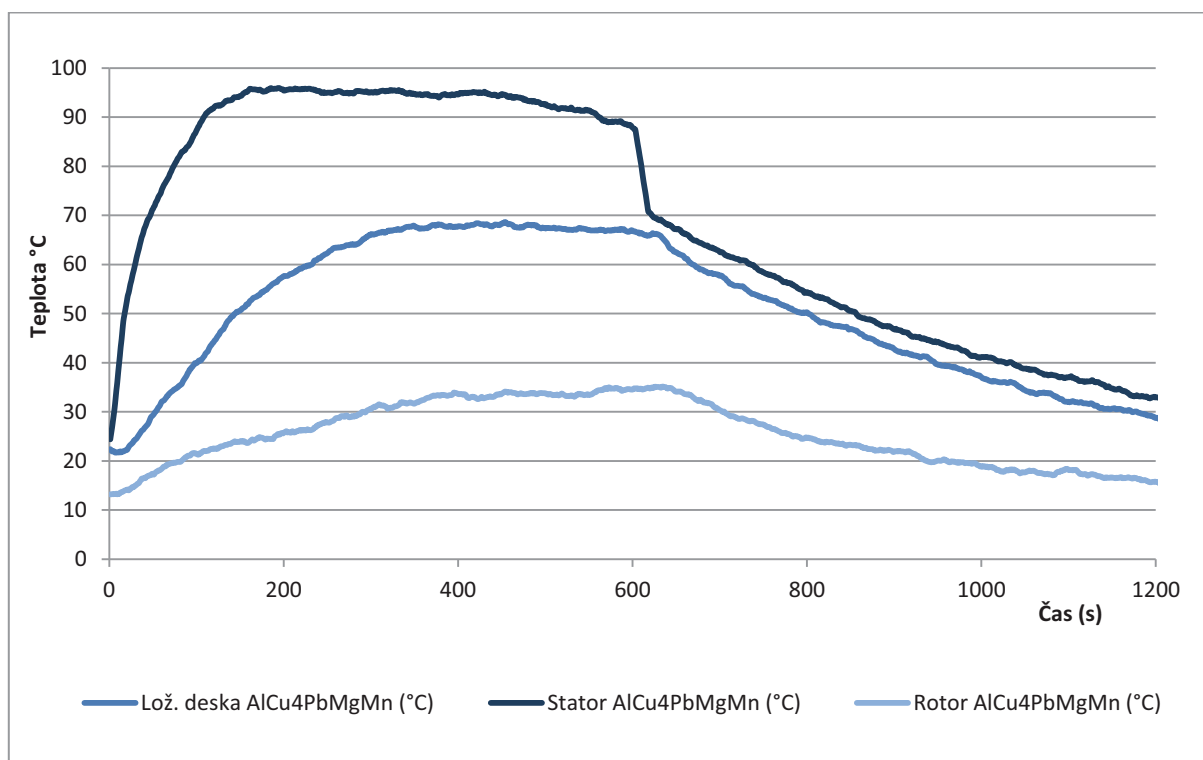
Výsledky měření na motorové brzdě obsahují teplotní průběhy, naměřené při konstantních otáčkách a konstantním kroutícím momentu. Dále byly na motorové brzdě naměřeny výkonové charakteristiky dynamických zkoušek a průběh účinnosti tří variant motorů s různými ložiskovými deskami.

Popis chování zvolených materiálů, testovaných pro použití na konstrukční části elektromotoru, bylo hodnoceno jednak pomocí průběhu naměřených teplotních křivek a sledováním vlivu materiálů na účinnost motoru. Samozřejmě byl také hodnocen vliv různých materiálů, použitých pro ložiskové desky, na průběh kroutícího momentu, konstruovanou jako funkce otáček motoru.

8.1.1 Teplotní průběhy

Při realizaci zkoušek na motorové brzdě hovoříme o tzv. pracovním bodu, který je definován hodnotou zátěže (kroutícího momentu) a hodnotou otáček. Pro naměření porovnatelných dat všech variant motorů byla provedena zkouška za stejných podmínek, tedy pro stejný pracovní bod a pro stejnou počáteční teplotu testovaného motoru. Konkrétně zkouška probíhala takto: Motor byl zatížen požadavkem plného kroutícího momentu 270Nm při 1500ot/min. V tomto pracovním bodě byly naměřeny teploty statoru, teploty rotoru a teploty vnější ložiskové desky. Motor byl zatížen v tomto pracovním bodě po dobu 10 minut. Přičemž dalších 10 minut po ukončení zátěže motoru jsme zaznamenávali pokles teplot s dále sepnutým chladícím okruhem.

Z průběhu hodnot motoru s ložiskovými deskami z materiálu AlCu4PbMgMn (Obr. 130) je možné porovnávat rozdíly mezi oteplením ložiskových desek, rotoru a statorového vinutí.

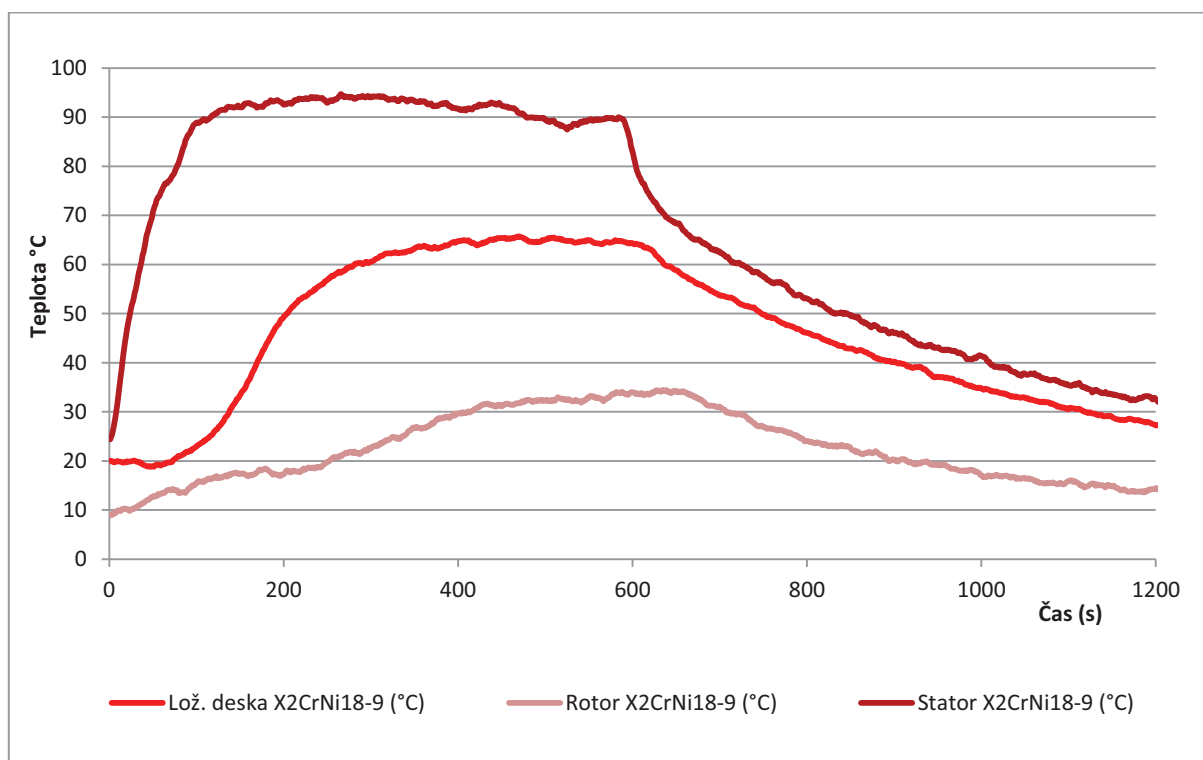


Obr. 130 Průběh teplot částí motoru při statické zkoušce pro materiál AlCu4PbMgMn

Ve statoru je tvořeno přes 50% celkových ztrát motoru (Clifford, a další, 2013). Proto naměřená teplotní závislost na čase pro stator leží nad teplotními průběhy ostatních konstrukčních částí elektromotoru. Ve statoru vznikají ztráty ve vinutí, dále pak ztráty v magnetickém obvodu. Z toho důvodu je stator aktivně chlazen oběhem olejového chladiva, díky čemuž se teplota statoru ustálí a dále neroste. Z grafu je vidět rychlý nárůst teploty statoru (Obr. 130, Obr. 131, Obr. 132).

Rotor je ohříván ztrátami v magnetickém obvodu a dále pak je ohříván díky rozdílu teplot teplem ze statoru. Naměřená teplotní závislost na čase pro rotor leží dole pod teplotními průběhy ostatních konstrukčních částí elektromotoru.

Ložiskové desky mají z konstrukčních částí elektromotoru největší stykovou plochu s okolím a použitý materiál těchto desek ovlivňuje především teplotní křivku rotoru, který nemá aktivní olejové chlazení.

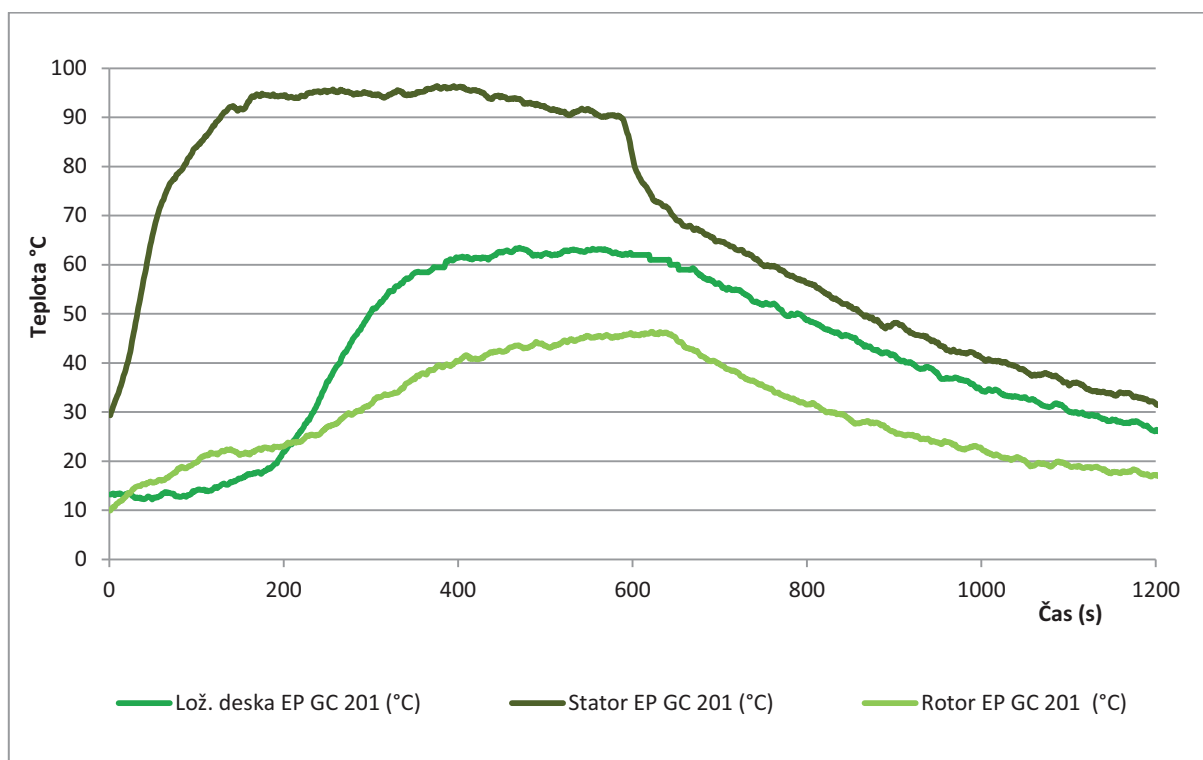


Obr. 131 Průběh teplot částí motoru při statické zkoušce pro materiál X2CrNi18-9

Ložiskové desky jsou zahřívány magnetickými ztrátami a přenosem tepla z rotoru a částečně také statoru, proto úrovně naměřených teplot zaujímají střední hladinu hodnot (Obr. 130, Obr. 131, Obr. 132).

Vzájemná poloha naměřených teplotních křivek v souřadném systému $T=f(t)$ je obdobná pro použití AlCu4PbMgMn, X2CrNi18-9 pro ložiskové desky motoru viz Obr. 130, Obr. 131.

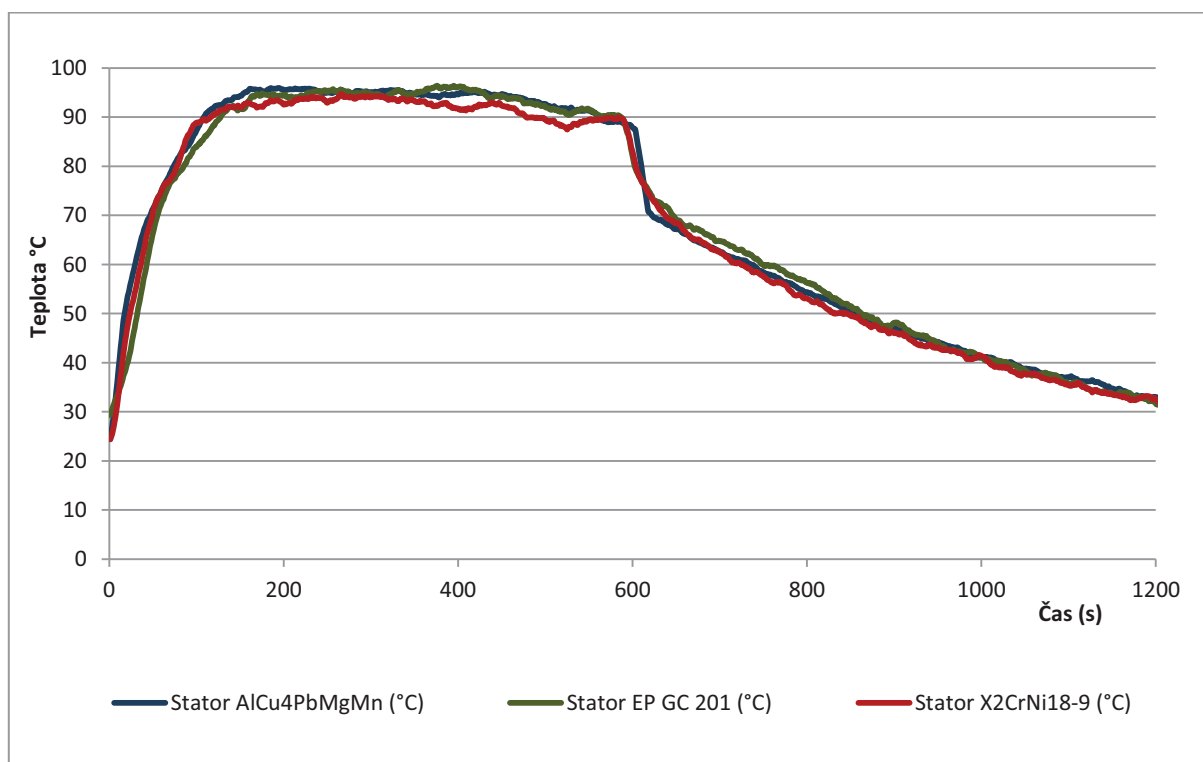
V počáteční části teplotních křivek pro stator ložiskové desky z materiálu EP GC 201 lze z navržené metodiky testování materiálu vyzorovat posunutí teplotního průběhu rotoru na teplotní průběh ložiskové desky Obr. 132. Tento vliv materiálu EP GC 201 hraje významnou roli při akceleračních testech v rámci měření realizovaných na reálném provozu elektromobilu.



Obr. 132 Průběh teplot částí motoru při statické zkoušce pro materiál EP GP 201

8.1.2 Průběh teploty vinutí statoru motoru

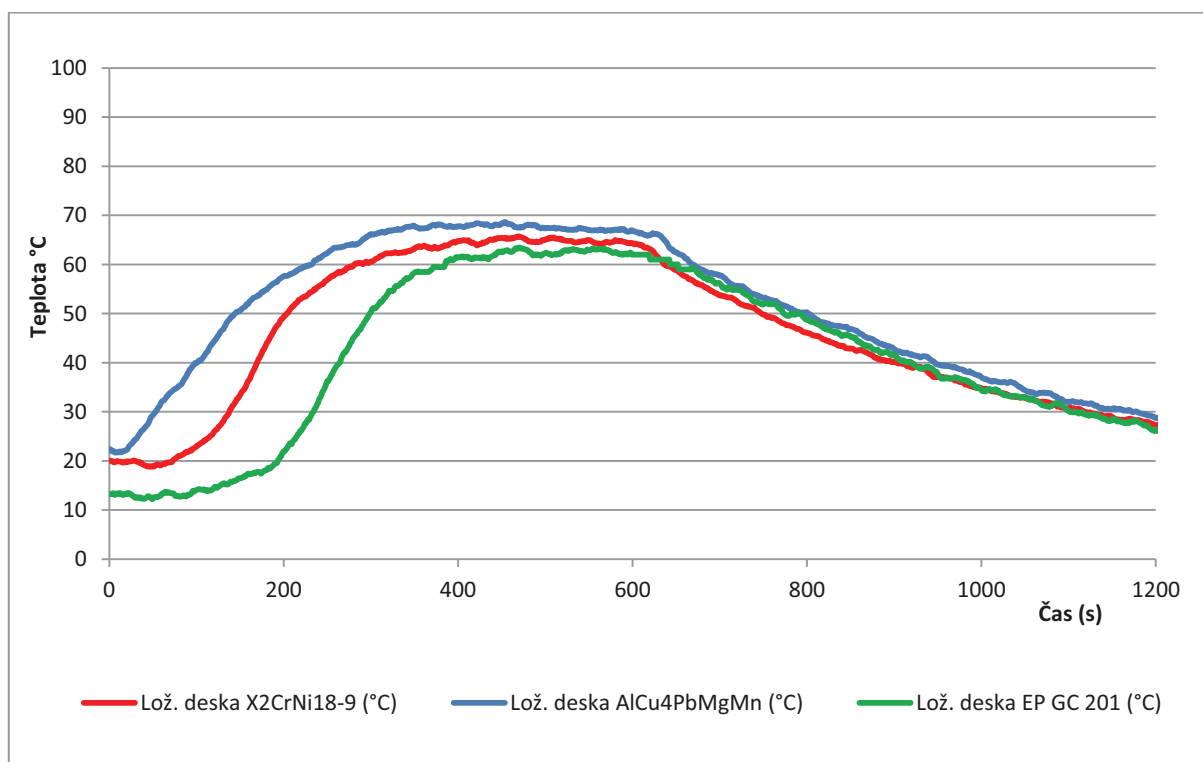
Na grafu (Obr. 133) vidíme průběhy teplot statorů všech variantních provedení experimentálních motorů. Průběhy jsou díky použití intenzivního olejového chlazení vyrovnané mezi sebou, obsahují pouze drobné odchylky nevelkého významu. Tím je zaručen korektní průběh vyvíjené zkoušky, zaměřené na studium vlivu použití různých materiálů pro ložiskové desky, kdy takto realizovaný experiment, díky konstantnímu průběhu teploty statoru, nezakresluje naměřené teplotní průběhy na ložiskových deskách pro jednotlivé použité materiály.



Obr. 133 Průběh teplot statorového vinutí při statické zkoušce

8.1.3 Průběh oteplení ložiskových desek

Naměřené teplotní křivky na Obr. 134 vykazují v přechodové části rozdílný průběh pro jednotlivé použité materiály. Nejrychlejší náběh teploty vykazuje motor s ložiskovými deskami z hliníkové slitiny AlCu4PbMgMn coby zástupce materiálu s nejnižším měrným odporem, u kterého se projevují v souladu s naměřenou charakteristikou $B=f(H)$ magnetické ztráty nejintenzivněji. Protipólem je materiál EP GC 201, ve kterém k magnetickým ztrátám nedochází. Mezi těmito materiály se nachází teplotní průběh materiálu austenitické oceli X2CrNi18-9.

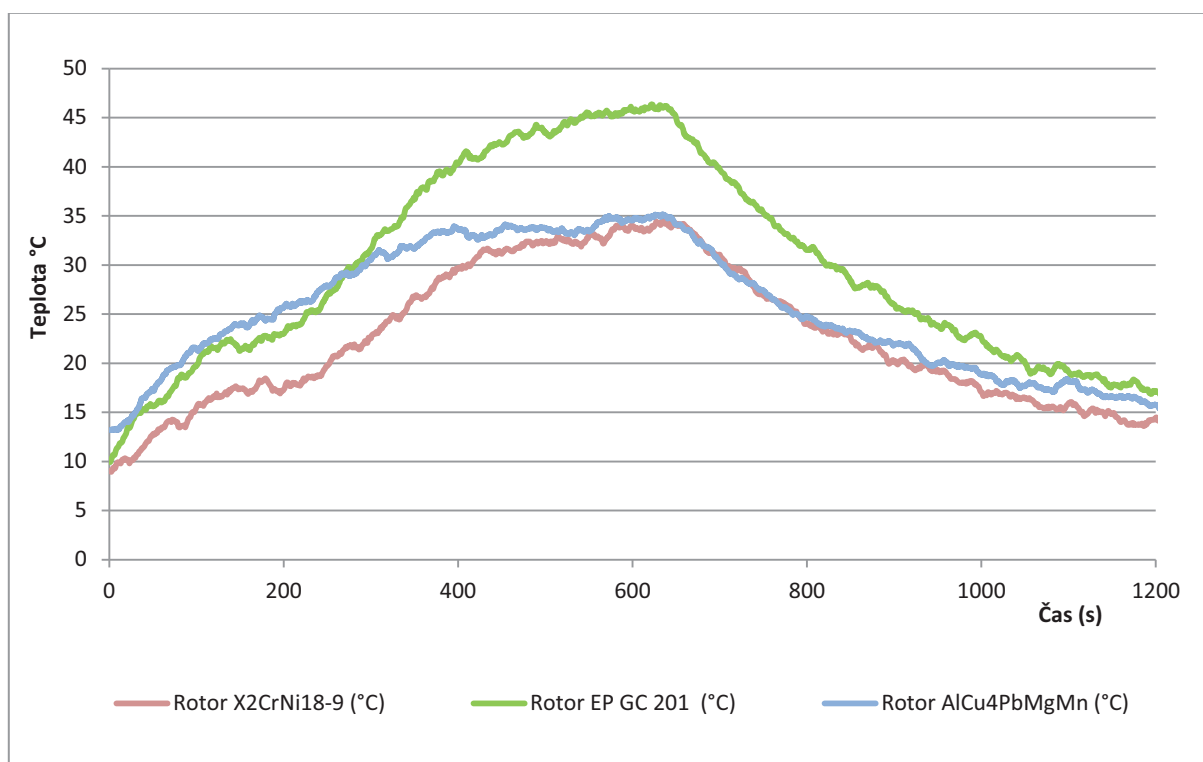


Obr. 134 Průběh teplot ložiskové desky při statické zkoušce

V rámci předpokladů, vyvozených z matematických modelů popsanych v této práci (viz kap. 6.4.), jsme předpokládali podstatně nižší ustálenou teplotu ložiskové desky z materiálu EP GC 201, kterou považujeme za referenční vzorek. Výrazně nižší teploty jsou pro EP GC 201 pouze v první polovině testu se zátěží přibližně do 6 minuty testu, potom se teploty jednotlivých variant vyrovnávají. Zřejmý důvod, proč není referenční ložisková deska výrazněji chladnější, najdeme při porovnání dat z měření rotorů, viz Obr. 135.

8.1.4 Průběh teploty rotoru

Na Obr. 135 je vidět silný nárůst teploty rotoru při použití ložiskových desek z materiálu EP GC 201 ve srovnání s ložiskovými deskami z materiálů X2CrNi18-9, AlCu4PbMgMn. Tento trend je dán špatnou teplotní vodivostí sklotextitových EP GC 201 ložiskových desek. Teplo, vznikající v rotorové magnetické části motoru, je tímto materiálem izolováno v rotorovém prostoru a projevuje se zvýšenou teplotou rotoru oproti zbylým materiálovým variantám. To je také z největší pravděpodobností důvod vyšší teploty ložiskové desky EP GC 201, než jsme předpokládali.



Obr. 135 Průběh teplot rotoru při statické zkoušce

Nicméně z uvedených grafů Obr. 134 vyplývá, že magnetickými ztrátami je nejvíce ovlivňován materiál AlCu4PbMgMn, dále pak X2CrNi18-9 a nejméně EP GC 201.

8.1.5 Výkonová charakteristika experimentálního motoru

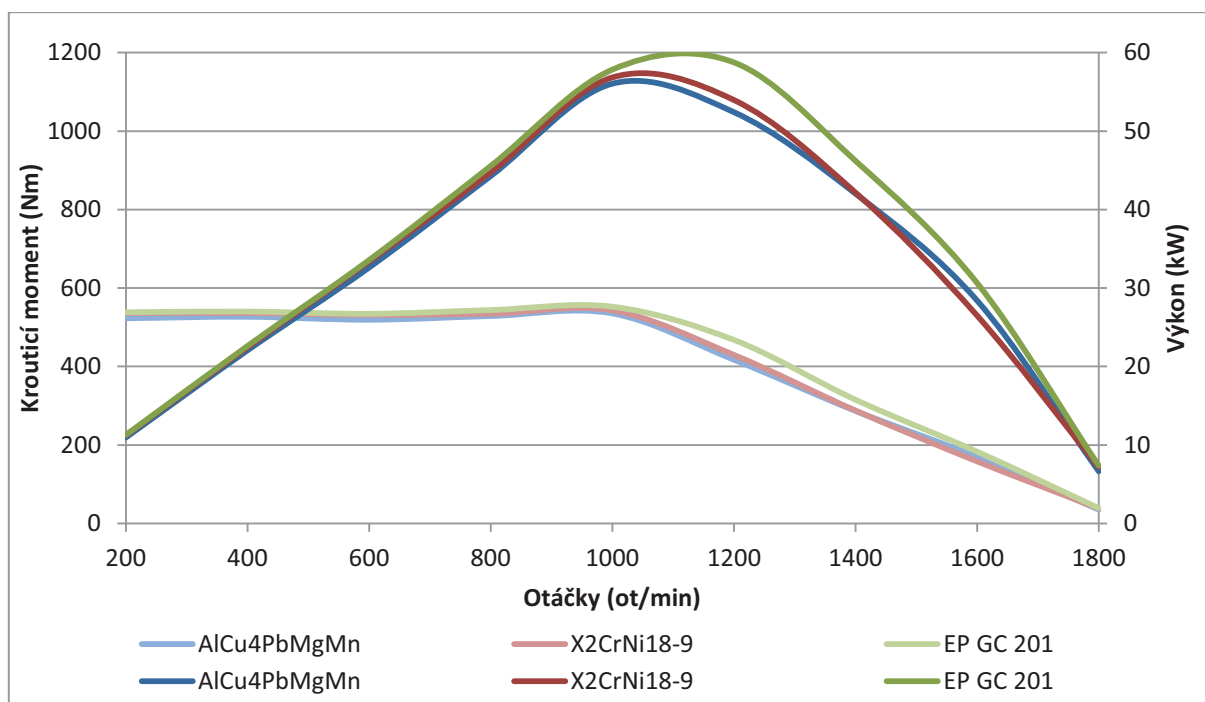
Další částí měření na motorové brzdě byly dynamické testy měření výkonnostních parametrů. V rámci tohoto experimentu byly varianty motoru testovány odbrzdováním při plném požadavku kroutícího momentu motoru v celém otáčkovém spektru. Tyto testy probíhaly na zahřátém motoru při počáteční teplotě přibližně 40°C statoru. Během testu teploty kolísaly podle aktuální proudové zátěže. Test probíhal v počtu pěti opakování pro každou variantu motoru a výsledné hodnoty byly zpracovány průměrováním do podoby uvedené v práci. Rozsah otáček realizovaných testů byl od 200ot/min do 1800ot/min. Testy probíhaly pouze do 1800 ot/min místo 2000ot/min, protože motor s ložiskovými deskami z AlCu4PbMgMn vykazoval během přípravných testů lehce nad 1900ot/min vibrace, které narušovaly měření polohy rotoru a řídicí jednotka motoru nebyla schopna správné regulace motoru. Tento nepříznivý stav byl zapříčiněn nedostatečnou tuhostí materiálu AlCu4PbMgMn ložiskových desek, proto jsme snížili limit otáček motoru omezovačem otáček v řídicí jednotce motoru na 1800ot/min.



Obr. 136 Vyztužené ložiskové desky z materiálu AlCu4PbMgMn

Pro ověření, zda k vibracím docházelo vinou nízké tuhosti materiálu AlCu4PbMgMn, provedli jsme dodatečně zesílení deskami z materiálu EP GC 201 viz Obr. 136. Další měření s vyztuženými ložiskovými deskami umožnilo zvýšit otáčky motoru. Ale z pohledu vývoje metodiky testování materiálů pro použití na konstrukční části elektromotoru není použití takto vrstveného materiálu vhodné, protože takto naměřená data nebudou porovnatelná s ostatními variantami, což je z pohledu vývoje testování materiálu velmi důležité. Takto vrstvené ložiskové desky sice řeší problém s nízkou tuhostí, ale způsobují problémy s odvodem tepla z motoru a hliníková část desky se podílí na vzniku magnetických ztrát. V grafu výkonnostní charakteristiky experimentálního motoru viz Obr. 137 jsou uvedeny naměřené průběhy kroutících momentů odečitatelné na hlavní svislé ose grafu. Na vedlejší svislé ose je umístěn odečet výkonu. Nejvyšší špičkový výkon podával motor materiálem EP

GC 201 ložiskových desek a to 59kW při 1200ot/min. Druhý nejvyšší výkon podával motor s ložiskovými deskami vyrobenými z austenitické oceli X2CrNi18-9, konkrétně 57kW při 1000ot/min. Nejnižší špičkový výkon 56kW vygeneroval motor z hliníkové slitiny AlCu4PbMgMn při 1000ot/min.

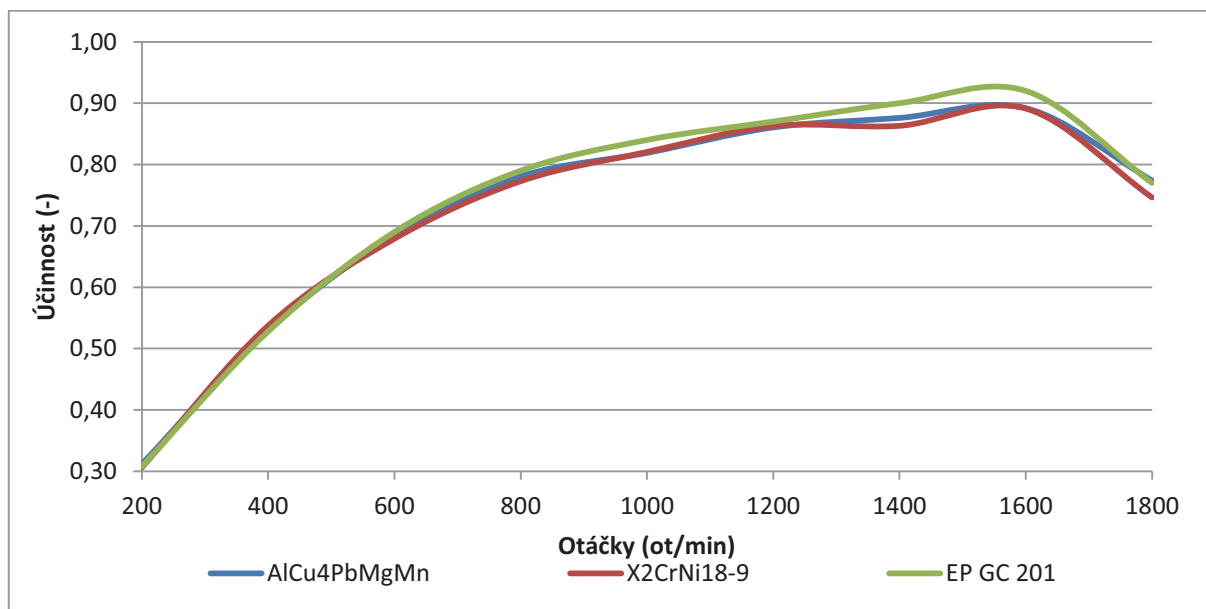


Obr. 137 Výkonová charakteristika experimentálního motoru při dynamické zkoušce

Vyšší jmenovité otáčky motoru EP GC 201 vycházejí z posunutí poklesu kroutícího momentu do vyšších otáček. Tento mírný nárůst výkonu svým charakterem odpovídá zisku energie, která se vlivem magnetických ztrát v ložiskových deskách nepřeměnila v odpadní teplo. Tento zisk je 2 až 3kW oproti variantám s kovovými ložiskovými deskami, a to je také přibližná hodnota, kterou jsme získali simulací pomocí metody konečných prvků. Zisk momentu oproti kovovým variantám motoru pouze ve vyšších otáčkách je dán podstatou tvorby vířivých proudů, které rostou s druhou mocninou frekvence, tedy s otáčkami rotoru. Se zvyšujícími se otáčkami rostou magnetické ztráty, jak uvádí také (A. Allaoui, 2002) . Proto se tento zisk projevuje až v oblasti nad 1000ot/min, kde ostatní motory ochabují. Tento trend zisku by měl nadále stoupat až do maximálních otáček motoru, nicméně tomu zabráňuje řídicí jednotka motoru, která uměle snižuje požadavek na moment před hranicí omezovače otáček.

8.1.6 Průběh účinnosti experimentálního motoru

Průběh účinnosti testovaných variant experimentálních motorů jsme prováděli zároveň s předchozím dynamickým testem. V rámci výkonnostního měření jsme zaznamenávali napětí a proud vstupující do motoru a na základě tohoto měření jsme vypočítali celkový aktuální příkon motoru, který byl konfrontován s mechanickým výkonem na hřídeli absorbéru motorové hydrodynamické brzdy SF-902. Výsledky jsou uvedeny v grafu na Obr. 138 vyobrazené závislosti účinnosti na otáčkách motoru při plném jeho zatížení. Z tohoto grafu můžeme vyčíst, ve kterém spektru otáček při plném zatížení je motor nejúčinnější. Jako nejúčinnější motor byl naměřen EP GC 201 s účinností dosahující 93% při 1550ot/min. Zbylé dva typy motoru měly nejvyšší účinnost při stejných otáčkách, oba dosáhly účinnosti 89%.



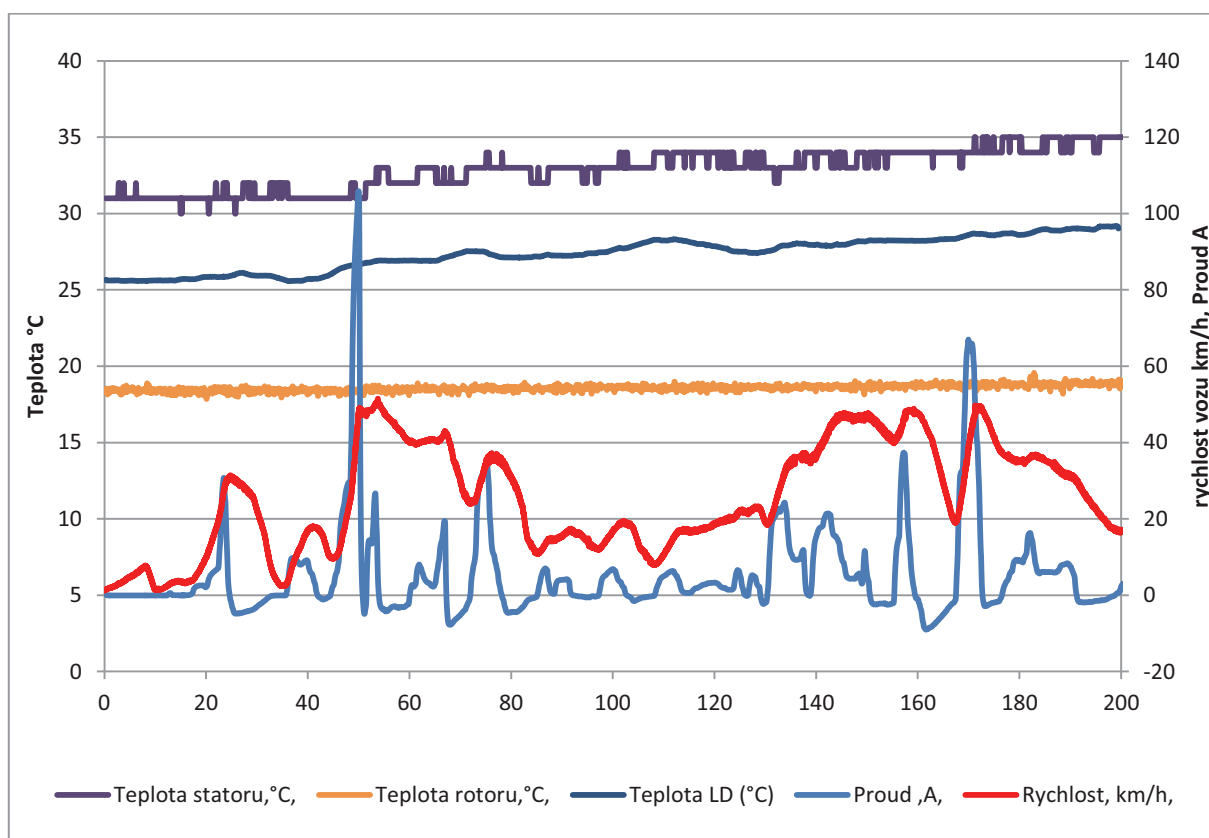
Obr. 138 Průběh účinnosti experimentálních motorů v závislosti na otáčkách při plném zatížení

Celkový průběh ukazuje a potvrzuje údaje výrobců podobných typů synchronních motorů, jako je (Remy International, Inc, 2010) nebo (Limited, 2016). Motor má nízkou účinnost pod plným zatížením v nízkých otáčkách a jeho účinnost narůstá za hranici jmenovitého výkonu, kde dosahuje nejvyšších hodnot a dále začíná klesat. Na vyšší účinnosti EP GC 201 je názorně vidět, jak materiál nepodléhající magnetickým ztrátám zvýšil účinnost experimentálního motoru o 3%. V souladu s předpokladem, že nižší účinnost motorů s ložiskovými víky z materiálů X2CrNi18-9, AlCu4PbMgMn je způsobena především mechanismem vířivých proudů, je poloha tohoto poklesu v horním rozsahu otáček intervalu od 1200 do 1600 ot/min. Od hodnoty 1600 ot./min je již měření zkresleno zásahem omezovače otáček řídicí jednotky motoru.

8.2 Výsledky měření při provozu elektromobilu

8.2.1 Městský provoz

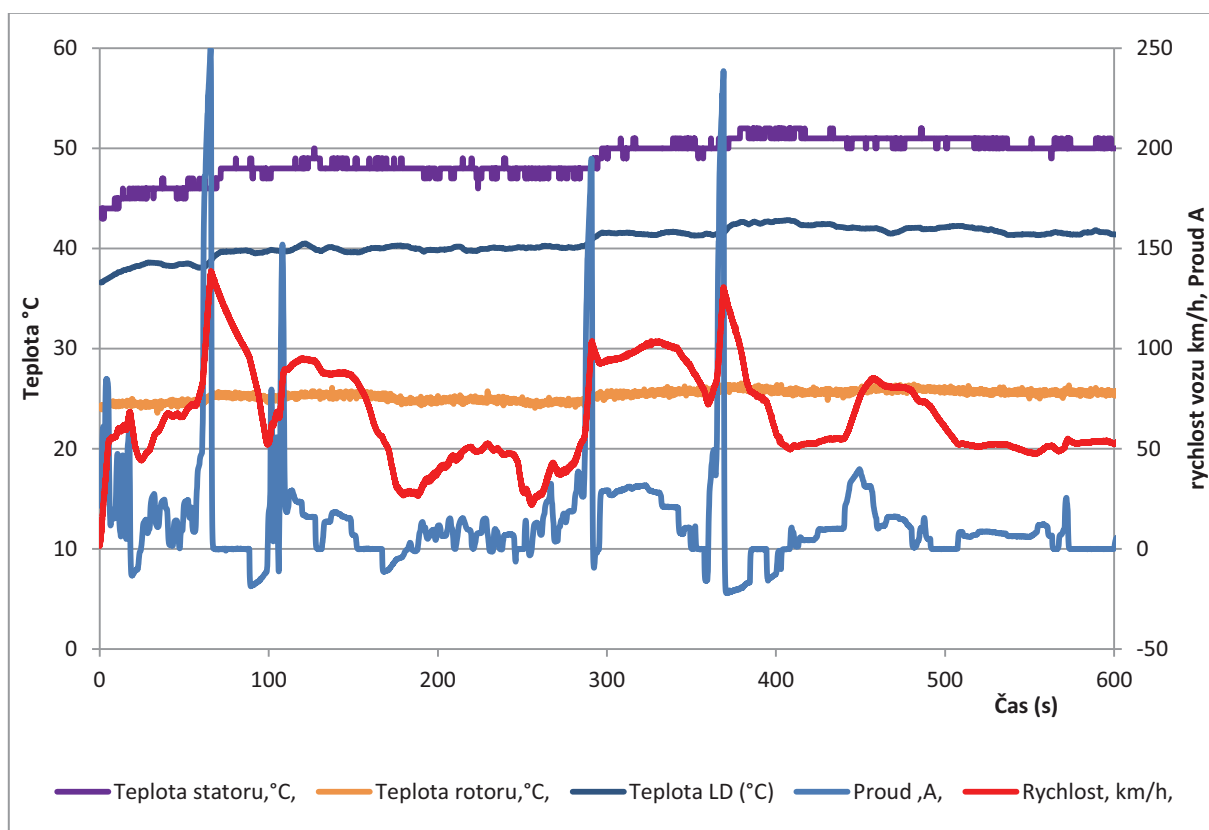
Městský provoz definujeme jako nerovnoměrný provoz podléhající dopravě výrazně nepřevyšující povolenou rychlost 50 km/h. Graf viz Obr. 139 zaznamenává provoz elektromobilu a popisuje průběhy teplot, statoru a rotoru motoru ložiskové desky, která byla z materiálu EP GC 201, stejně jako i další uvedené grafy. To jsme ověřili při dlouhodobých měřeních, které zde pro množství dat a přehlednost neuvádím. U tohoto provozu bych také zdůraznil mnohočetnost rekuperačního brždění viditelného jako záporné průběhy proudu modré křivky. Opět zde vidíme, že nejvýše je položena teplotní křivka statoru, teplotní křivka rotoru je nejnižší. Průběh teplot ložiskové desky leží mezi rotorem a statorem. Novým prvkem zatěžování konstrukčních částí motoru je rekuperace.



Obr. 139 Test oteplení pro městský provoz č.1

8.2.2 Kombinovaný provoz

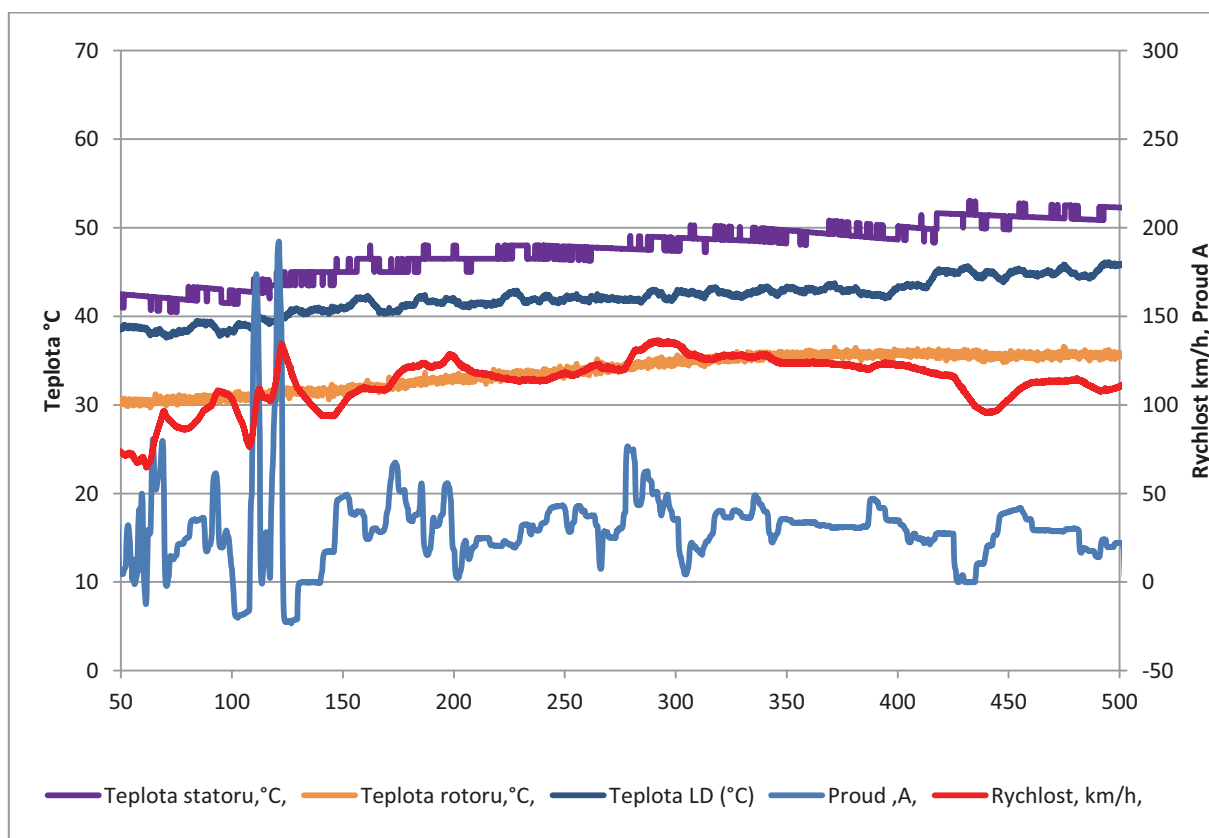
Kombinovaný provoz definujeme jako nerovnoměrný provoz, podléhající dopravě kolísající mezi maximální povolenou rychlostí 130km/h a městským provozem (50km/h). V grafu na Obr. 140 je vidět nárůst všech provozních teplot oproti městskému provozu. To zapříčiňuje vyšší spotřeba proudu pro pohon za jednotku času. Lze pozorovat, jak se prudké akcelerace projevují na teplotě satorového vinutí a malou měrou i na teplotě rotoru. Z grafu je patrné, že akcelerace stupňovitě zvyšuje teplotu ložiskových desek.



Obr. 140 Test oteplení pro kombinovaný provoz č.2

8.2.3 Dálniční provoz

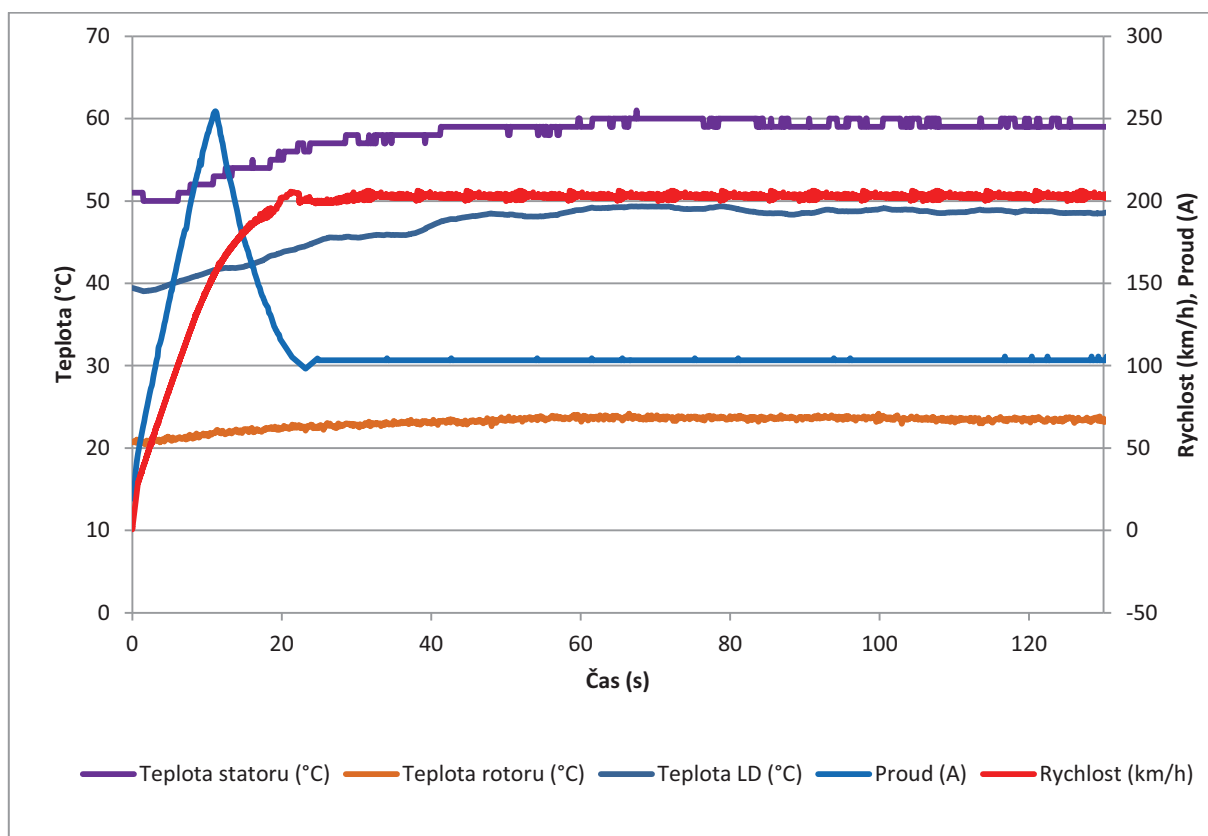
Dálniční provoz byl zaznamenán na Obr. 141 v rychlostech kolísajících dle provozu kolem 120 km/h. Z hodnot průběhu teplot jednotlivých částí je opět patrný nárůst související s vyšší rychlostí a větším odběrem proudu ze zdroje. V tomto sedmiminutovém záznamu je patrný setrvalý mírný nárůst teplot statoru přibližně 53°C a rotoru na úrovni 36°C i ložiskové desky na teplotu 45,9°C. Omezování výkonu motoru na základě vysoké teploty chladícího média je naprogramováno výrobcem řídicí jednotky nad 90°C, tedy s hodnotami do 70°C má vůz při dálniční rychlosti jisté rezervy.



Obr. 141 Test oteplení pro dálniční provoz č.3

8.2.4 Maximální rychlost

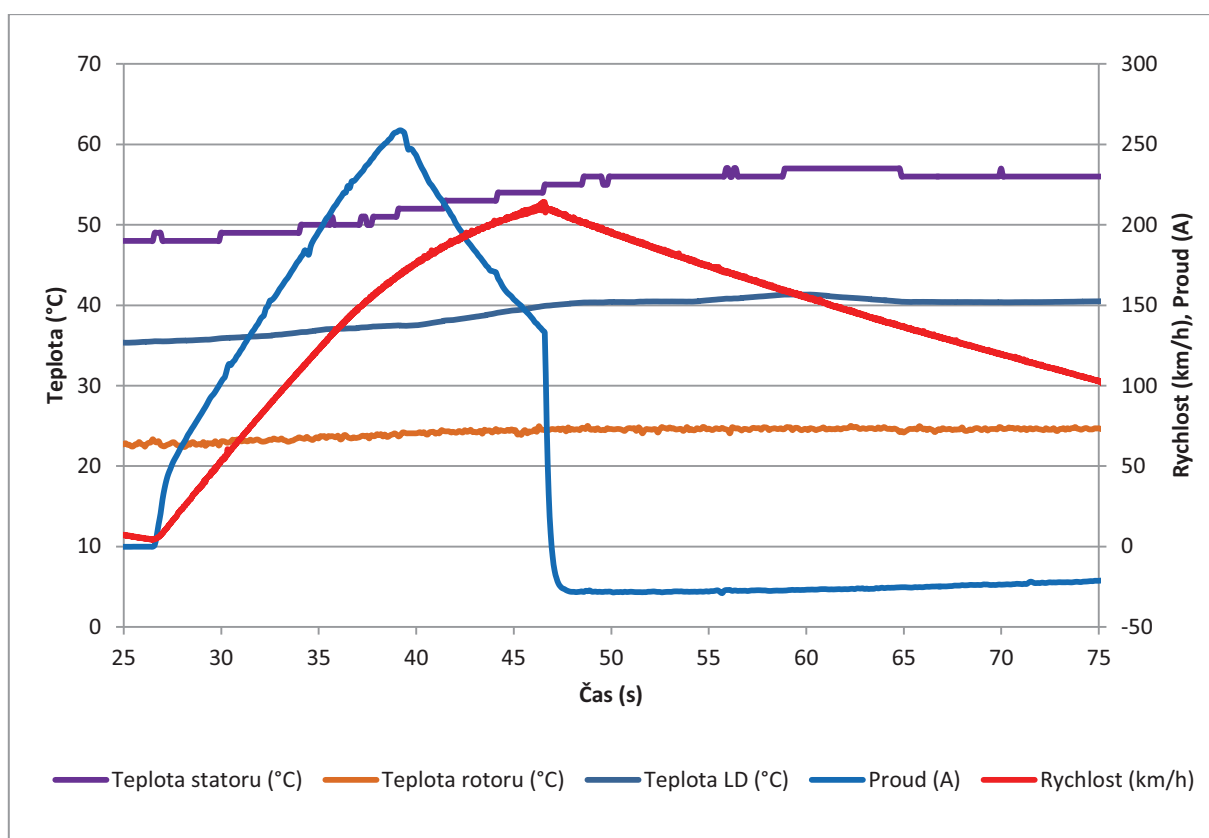
V tomto měření viz Obr. 142 byl vůz uveden do maximální rychlosti elektronicky omezené na 205 km/h a ponechán v této rychlosti po dobu 2 minut. Při poklesu proudu u konce akcelerace a ustálení rychlosti začaly teploty rotoru, statoru i ložiskové desky kulminovat a tento stav setrval po zbytek testovacího času. Toto lze přisuzovat zvýšené intenzitě ochlazování proudícím vzduchem i faktu, že motory pracovaly v otáčkovém rozsahu, ve kterém dosahují maximální účinnost. Pro udržení rychlosti 205 km/h za ideálních podmínek tedy motor spotřebovává kolem 100 A proudu se jmenovitým napětím kolem 300 V. To odpovídá 30 kW příkonu pro jeden ze čtyř motorů. Pro zajímavost by při této rychlosti elektromobil ujel při plném nabití 32km za 9 minut. Tedy nabízí se otázka, zda by došlo k přehřátí dříve než k vybití battery packu.



Obr. 142 Graf z měření při maximální rychlosti 205 km/h (120s)

8.2.5 Akcelerační zrychlení

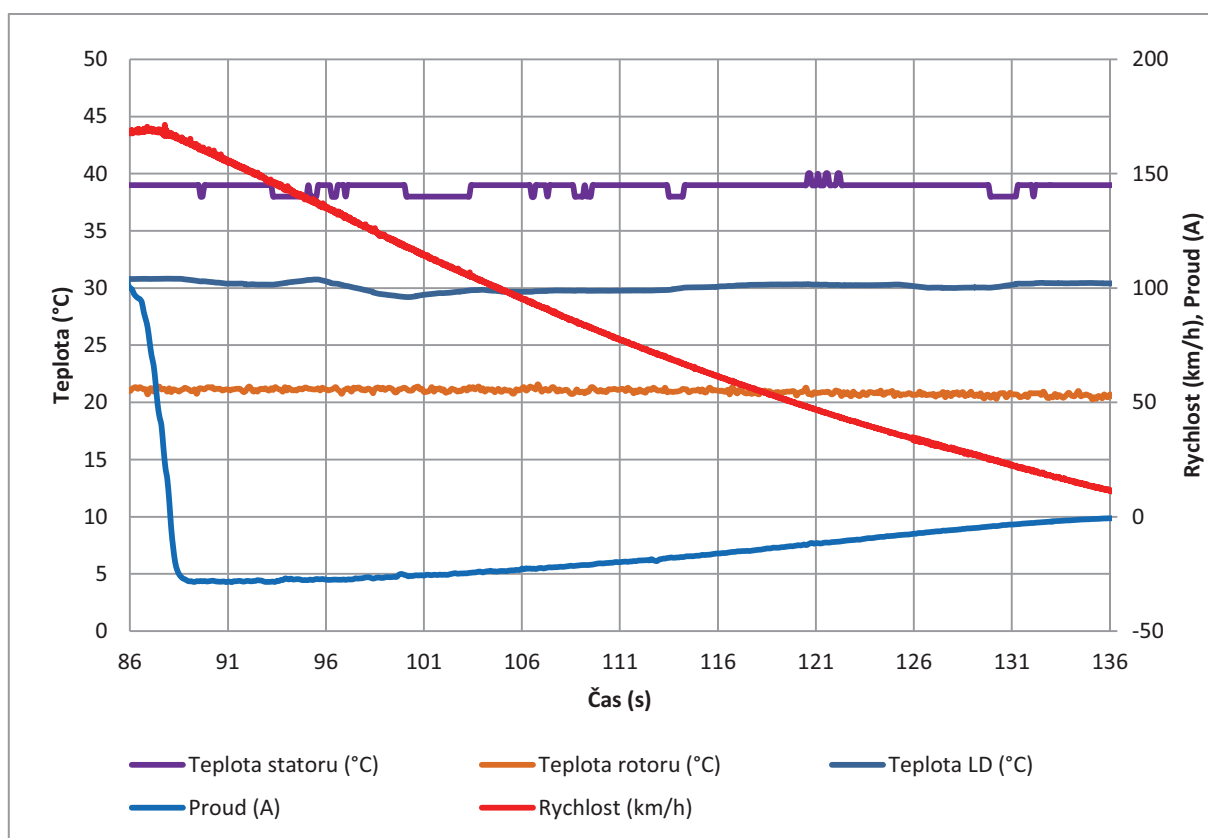
Z akceleračního testu viz Obr. 143 je obdobně jako v případě Obr. 142 viditelný mírný nárůst teploty statoru, pozvolný nárůst teploty rotoru i teploty ložiskové desky. Po dokončení akceleračního manévru teploty kulminují a pozvolna začínají klesat účinkem chladicího oběhu elektromobilu. Tento způsob testování vystavuje testované materiály největšímu zatížení.



Obr. 143 Graf z testu akceleračního zrychlení s plnou zátěží do maximální rychlosti 205 km/h

8.2.6 Rekuperační brzdění

Z posledního testu při provozu elektromobilu vyplývá, že rekuperační brzdění v kombinaci s touto chladicí soustavou a uvedenými komponenty nemá zásadní vliv na oteplení statoru, rotoru či ložiskové desky testovaného motoru. Je to dáno několika faktory. Hlavní důvod je nízký požadavek na rekuperaci nepřesahující 40 A na jeden motor. Při dlouhodobém zkoušení bylo zjištěno, že přirozený brzdňý proud, který nenaruší intuitivní ovládání vozu, je do 160 A celkového proudu. Takového rekuperačního brzdění odpovídá brzdění motorem jako u automobilu s vnitřním spalováním. Je to tedy nízký proud nepřevyšující chladicí účinnost chladicí soustavy. Pro testování vlivu rekuperace na materiály konstrukčních skupin elektromotorů se ukazuje, že by bylo vhodnější použít aktivní motorovou brzdu.



Obr. 144 Graf z měření brzdění pomocí rekuperace s plynulým náběhem rychlosti 150 km/h

9 Shrnutí získaných poznatků

Jeden z hlavních cílů této disertační práce bylo, realizovat vývoj experimentálního zařízení pro testování materiálů použitých na konstrukční části elektromotorů z pohledu magnetických ztrát, resp. dopadu těchto ztrát na oteplení a výkonové parametry motorů. Aktuální trendy eliminace těchto ztrát jsou v rámci známých vědeckých poznatků (W.J.Carr, 2001), (SCHÖNBAUER, 2011), hlavně v použití speciálních materiálů. Pro uvedení do problematiky, disertace obsahuje studii vytvořenou na základě odborných prací z oblasti vlivů různých materiálových parametrů či stavů materiálů na vznik magnetických ztrát. Studie zohledňovala například vliv teploty, napětí v materiálu, vliv chemického složení, vliv velikosti zrn či vliv struktury.

Tato práce svou teoretickou částí, popisuje mechanismy tvorby magnetických ztrát a poukazuje na vlastnosti a provázání materiálových konstant a parametrů, které tyto ztráty ovlivňují ve vazbě na konstrukci axiálního motoru. Díky tomu byla vytvořena platforma experimentálního motoru, na které je možné testovat materiály ve vztahu k magnetickým ztrátám a oteplení. Práce také obsahuje nezbytnou metodiku a podrobný popis měřicí soustavy a měřících přístrojů.

Materiály pro výrobu ložiskových desek (testovacích vzorků) byly zvoleny ze tří různých konstrukčních materiálů rozdílného charakteru. Zohlednili jsme přitom nejpoužívanější konstrukční materiály v automobilovém průmyslu, jako jsou zástupci hliníkových slitin, ocelí a kompozitů. Z tohoto důvodu byl navržen zástupce pro každou tuto oblast. V rešerši k výběru konkrétních materiálů, byly popsány vlastnosti ovlivňující výběr testovacích vzorků jako je rezistivita, permeabilita, pevnost a teplotní vodivost. Ložiskové desky byly shodně obrobeny 5-osým obráběcím centrem. Tím byla zaručena přesnost a porovnatelnost jednotlivých typů.

S ohledem na tyto výše popsané požadavky byla ze zástupců slitin hliníku zvolena slitina všeobecně označovaná jako dural konkrétně slitina AlCu4PbMgMn s doplňkovými legujícími prvky jako je hořčík (snižující vodivost) a olovo (zvyšující obrobitelnost).

Ze zástupců ocelí byl pro tento záměr, zvolen nemagnetický materiál, s vysokou pevností a vysokou rezistivitou, dobrou teplenou vodivostí a vhodnou obrobitelností pro použití na ložiskové desky. Byla zvolena chrom niklová austenitická korozivzdorná ocel X2CrNi18-9.

Třetím typem zvoleného materiálu pro výrobu ložiskových desek testovacího zařízení byl zvolen materiál označovaný EP GC 201 z řady kompozitů pro elektrotechniku, komerčně nazývaný sklotextit. Volba byla provedena s ohledem i na jeho nenasákavost oproti Kartitům nebo Textitům, které obsahují nasákové pojivo jako je papír a textil a nejsou vhodné k obrábění.

Po získání polotovarů pro výrobu testovacích vzorků byly provedeny zkoušky fyzikálních vlastností materiálů. Ověření se skládalo z tahových zkoušek, měření tvrdosti, zkoušek elektromagnetických vlastností a mikrostrukturních analýz.

Následovala fáze přípravy experimentu, ve které byl proveden návrh, výpočet a výroba experimentálního motoru. Součástí této rozsáhlé přípravy byl rozměrový výpočet včetně popisu navržených výrobních materiálů. To jsou potřebná data pro vytvoření modelu motoru v CAD prostředí pro tvorbu výkresové dokumentace, ale také pro modelování MKP tvorby magnetických ztrát v ložiskových deskách coby testovaných vzorků. Metodou konečných prvků (MKP) bylo vypočteno množství ztrátového výkonu 3,7% z výkonu motoru podávaném při 1500 ot/min pro materiál z hliníkové slitiny a 1% v případě nerezové ocele.

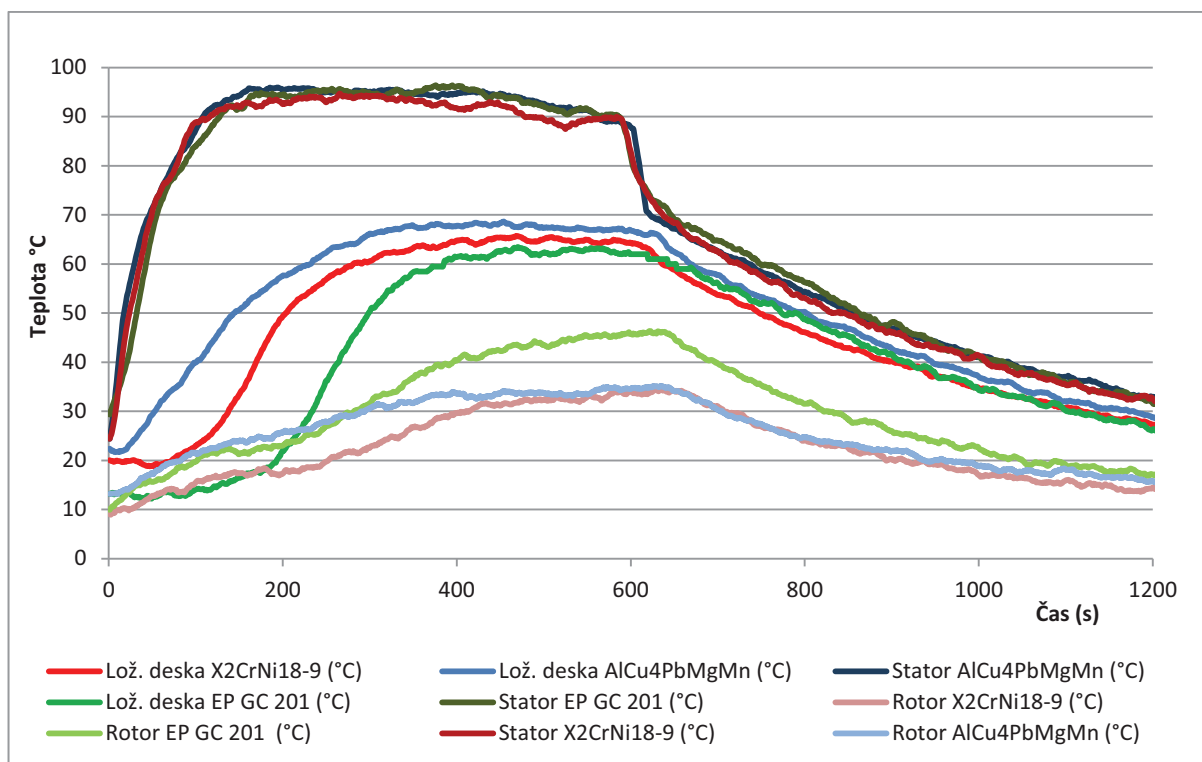
Vlastním experimentálním měřením byla při testech, na hydrodynamické motorové brzdě a následně i při provozu motorů v elektromobilu, potvrzena správná funkce experimentálního zařízení, která dokládá jednotlivé rozdíly materiálů na základě naměřených dat.

Vyvinuté experimentální zařízení v podobě experimentálního motoru s výměnnými ložiskovými deskami coby zkušebními vzorky, umožnilo popsat a porovnat libovolné materiály. Vzájemným porovnáním naměřených dat můžeme vhodně posoudit vliv na tvorbu magnetických ztrát a také posoudit teplotně izolační či vodivostní parametry materiálových vzorků.

Na motorové brzdě bylo provedeno měření teplotních průběhu při ustáleném testu, měření výkonových parametrů a průběh účinnosti motoru při plném zatížení.

Průběhy teplot (Obr. 134) ukazují rozdíly v materiálech a různé hladiny teplot přímo určují, zda je použitý materiál vhodný pro aplikace, kde hrají magnetické ztráty významnou roli. Z průběhů teplot rotorů (Obr. 135) lze, s ohledem na konstrukční uspořádání stroje, odvodit teplotně vodivostní či izolační parametry zkoumaných materiálů. Rotor je při testu uzavřen mezi konstantně ohřátým statorem a ložiskovou deskou ze zkoumaného materiálu. Na teplotě rotoru se tedy musí projevit, pokud je materiál ložiskové desky izolačního (mat. EP GC 201) nebo teplotně vodivého charakteru

(mat. X2CrNi18-9). Nicméně celkové porovnání (Obr. 145) tyto výše popsané mechanismy propojuje do celku. Konkrétně lze pozorovat nižší oteplení ložiskové desky EP GC 201 a zároveň nejvyšší oteplení rotorů, které dokazuje izolaci tepla v rotorové části, ale zároveň nejnižší vzniklé magnetické ztráty v ložiskových deskách.



Obr. 145 Souhrnný graf průběhu teplot částí motorů při statické zkoušce

Zkouška výkonových parametrů prokázala vliv materiálu na výsledný moment motoru a k tomu ekvivalentní výkon, kdy výkonová křivka pro materiál EP GC 201 ve kterém nevznikají magnetické ztráty, obsahovala zisk výkonu čítající 2,5 kW respektive 3,5 kW vůči X2CrNi18-9 respektive AlCu4PbMgMn pro 1200ot/min. Procentuálně je nárůst výkonu EP GC 201 vůči X2CrNi18-9 4,2% a 6% vůči AlCu4PbMgMn. To jsou rozdíly vycházející z naměřených dat krouticího momentu.

Z průběhu účinnosti můžeme vyčíst, ve kterém spektru otáček při plném zatížení je motor nejúčinnější. Jako nejúčinnější motor byl naměřen EP GC 201 s účinností dosahující 93% při 1550ot/min. Zbylé dva typy motoru měli nejvyšší účinnost při stejných otáčkách, oba dosáhli účinnosti 89%. Nárůst účinností pro materiál EP GC 201 činil 4%. Měření tak doplnilo mozaiku informací pro vzájemné porovnání materiálů.



Aplikace vybrané varianty materiálu EP GC 201 v axiálních motorech při provozu elektromobilu ověřilo materiál EP GC 201 jako vhodnou alternativu k dříve užívané oceli. Měření dále odpovídalo trendům a poznatkům z měření v laboratorních podmínkách na motorové brzdě. Tedy chování teplot jednotlivých sledovaných částí v provozu. Toto ověření bylo důležité, protože v reálném provozu dochází k celé řadě vlivů, které nelze simulovat na hydrodynamické brzdě. Jedná se např. o projevy setrvačných sil (přetížení příčné, podélné), rekuperaci, proměnlivou účinnost chlazení, působící budící spektra od vozovky. Tyto testy ukázaly, při opakovaných akceleračních manévrech, tvorbu akumulované ztrátového tepla, které způsobí nárůst teplot statoru, rotoru i ložiskových desek.

Výše uvedené shrnuté poznatky vytváří znalostní základ pro možný navazující aplikační vývoj. Například konstrukční řešení odvodu tepla z rotorové části motoru. Řešení nevhodných vlastností některých materiálů řízenou kombinací materiálů vrstvením. Měřicí metodu by bylo vhodné doplnit o další měření. Příkladem by mohlo být tenzometrické měření průhybu ložiskových desek při namáhání nebo akcelerometrické měření vibrací ložiskových desek. V rámci řešení této práce byly splněny všechny vytyčené cíle. Vyvinutá metodiky testování je použitelná i pro další skupiny materiálů.



10 Použitá literatura

A. Allaoui, S. Bai, H.M. Cheng, J.B. Bai. 2002. Mechanical and electrical properties of a MWNT/epoxy composite. *Composites Science and Technology*. 7. 7 2002.

AB, Höganäs. 2016. Höganäs AB. www.hoganas.com. [Online] 4 2016. [Citace: 26. 8 2016.] https://www.hoganas.com/globalassets/media/sharepoint-documents/BrochuresanddatasheetsAllDocuments/SomaloyPrototypingMaterial_March_2016_1334HOG.pdf. 1334HOG.

Adewale, Ibukun Dapo, and Gui Yun Tian. 2013. Decoupling the influence of permeability and conductivity in pulsed eddy-current measurements. *Magnetics, IEEE Transactions on* 49.3. 2013, Sv. 1119-1127.

Aerospace, Henkel Corporation. 2013. Henkel. www.henkel.com/aerospace. [Online] 9 2013. [Citace: 27. 8 2016.] [https://tds.us.henkel.com/NA/UT/HNAUTTDS.nsf/web/B02C099805BD377385257BC60067B0E3/\\$File/LOCTITE%20EA%209394%20AERO-EN.pdf](https://tds.us.henkel.com/NA/UT/HNAUTTDS.nsf/web/B02C099805BD377385257BC60067B0E3/$File/LOCTITE%20EA%209394%20AERO-EN.pdf). CA 94565.

AG, Siemens. 2016. New energy efficiency classes. *Siemens.com Global Webside*. [Online] Siemens, 2016. [Citace: 6. 2 2016.] http://w3.siemens.com/topics/mea/en/energy-efficient-production/standards-and-legislation/efficiency-classes-for-motors/faq/pages/default.aspx#When_20will_20the_20catalogs_20be_20changed_20over_3f.

ASSURICH. 2016. Assurich. <http://www.assurich.com.my/>. [Online] ASSURICH INDUSTRIES, 2016. [Citace: 27. 8 2016.] <http://www.assurich.com.my/engine-dynamometer-system-superflow-sf-902-engine-dyno.htm>.

B. Heller, V. Hamata. 1961. *Přídavná pole, síly a ztráty v asynchronním stroji*. Praha : Academia ČSAV, 1961.

2014. Brushless Motors - Outer rotor type (the rotor is outside the stator). <http://www.nidec.com/>. [Online] 2014. [Citace: 2. 10 2014.] <http://www.nidec.com/en-NA/technology/capability/brushless/>.

C. Y. LIU, K. J. JIANG and Y. ZHANG. 2011. DESIGN AND USE OF AN EDDY CURRENT RETARDER. *International Journal of Automotive Technology*,. Vol. 12, 2011, 4.

C.L. Kane, E.J. Mele, R.S. Lee, J.E. Fischer, P. Petit, H. Dai, A. Thess, R. E. Smalley, A.R.M.Verschueren, S.J. Tans, C. Dekker. 2008. *Temperature Dependent Resistivity of Single Wall Carbon Nanotubes*. Philadelphia : Department of Physics, University of Pennsylvania, 2008.

Clifford, C. a Carr, E. E. 2013. A coordinated presentation of A-C and D-C. *Electric machinery*. 2013.



COMSOL, Inc. 2016. Induction Heating. www.comsol.com. [Online] 2016. <https://www.comsol.com/multiphysics/induction-heating>.

Čech, Radim. 2016. Measurement of the prototype axial electric motor on the hydrodynamic brake SF-902. *Workshop Laboratory of Materials and Technologies for Automotive Industry 2016*. Ostrava : VŠB - TU Ostrava, 2016. 1. ISBN 978-80-248-3933-2.

Číhal, V. 1999. Korozivzdorné oceli a slitiny. Praha : Academia, 1999. ISBN 80-200-0671-0.

2014. Daxa trade. [Online] DAXA 1 Trade s.r.o., 2014. [Citace: 21. 2 2016.] <http://www.daxa1trade.cz/files/uploads/Stainless-Steel-Design.jpg>.

EHRENSTEIN, W. G. 2009. Polymerní kompozitní materiály. Praha : Scientia, 2009. 1, str. 351. ISBN 978-80-86960-29-6..

Elektro. 2010. *Supravodivost – perspektivní technologie blízké budoucnosti*. místo neznámé : odborný časopis pro elektrotechniku, 2010.

F. Badin¹, F. Le Berr, G. Castel, JC. Dabadie, H. Briki, P. Degeilh, M. Pasquie. 2015. Energy efficiency evaluation of a Plug-in Hybrid Vehicle. *Worldwide harmonized procedure and actual use*. 2015.

F. Khodabakhshi, M. Kazeminezhad. 2011. The effect of constrained groove pressing on grain size, dislocation density and electrical resistivity of low carbon steel. *Materials and Design*. 2011.

F.J.G. Landgraf, M. Emura. 2002. Losses and permeability improvement by stress relieving fully processed electrical steels with previous small deformations. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2002.

F.J.G. Landgraf, M.F. de Campos, J. Leicht. 2008. Hysteresis loss subdivision. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 7. 4 2008.

Gerhard Schweitzer, Eric H. Maslen. 2009. *Magnetic Bearings - Theory, Design and Application to Rotating Machinery*. New York : Springer, 2009. ISBN 978-3-642-00497-1.

Gieras, J., F. 2004. Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machine. Dordrecht, The Netherlands : Kluwer Academic Publishers, 2004. ISBN 1-4020-26-67.

Gieras, J., F. 2002. Permanent Magnet Motor Technology. New York : Marcel Dekker, 2002. ISBN 0-8247-0739-1.

GIERAS, Jacek F, Rong-Jie WANG, Maarten J KAMPER. 2004. Axial flux permanent magnet. Boston : Kluwer, 2004. ISBN 14-020-2720-6.



Grégr, Jan. 2004. Povrchové vlastnosti uhlíkových vláken. *Katedra chemie FP*. místo neznámé : TU v Liberci , 2004.

H.Q. Yan, R.R. He, J. Johnson, M. Law, R.J. 2003. Dendritic Nanowire Ultraviolet Laser Array. *J. Am. Chem. Soc.* místo neznámé : American Chemical Society, 2003. 10.1021/ja034327m.

HAJKO, V., POTOCKÝ L., ZENTKO A. 1982. *Magnetizačné procesy*. Bratislava : Alfa, 1982.

Handbook, ASM. 2003. *Welding. Brazing and Soldering*. USA : ASM, 2003. 6. ISBN 0-87170-382-3.

Hansanet. 2016. Charakteristika Sklotextit. [Online] HANSANET s.r.o., 2016. [Citace: 10. 2 2016.] <http://www.hansanet.cz/kategorie-clanku/5/kontakty.aspx>.

Hassenteufel, J. 1971. *Elektrotechnické materiály*. Bratislava : Alfa, 1971.

Holub, Gustav. 2011. Nové třídy účinností asynchronních motorů. *Elektro*. místo neznámé : Elektro, 2011.

Chen., C. W. 1977. *Magnetism and metallurgy of soft magnetic materials*. Amsterdam : North-Holland Publishing Company, 1977.

J. F. Gieras, M. J. Kamper, R.-J. Wang. 2004. *Axial Flux Permanent Magnet Brushless*. místo neznámé : Springer, 2004. ISBN 1-4020-2720-6.

J. Leichta, N.A. Castroa, E.C. Silvaa, F.J.G. Landgrafb, A.J. Mosesc, T. Yonamined. 2008. Magnetic properties of 6.5% silicon content non-oriented electrical steel. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials - Science Direct*. 4. 6 2008.

Jaromír Drápala, Miroslav Kursá. 2012. *ELEKTROTECHNICKÉ MATERIÁLY*. Ostrava : Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2012. ISBN 978-80-248-2570-0.

—. **2007.** Elektrotechnické materiály. *Elektrotechnické materiály*. [Online] Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2007. [Citace: 29. 2 2016.] http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/ETMAT/animace%20SWF/4_Magneticke_materialy.swf.

Jianming Mai, Linfa Peng, Zhongqin Lin, Xinmin Lai. 2011. Experimental study of electrical resistivity and flow stress of stainless steel 316L. *Materials Science and Engineering A*. 2011.

Jiří Brožovský, Petr Konečný. 2013. <http://mi21.vsb.cz/>. *METODA KONEČNÝCH PRVKŮ VE STAVEBNÍ MECHANICE*. [Online] 2013. [Citace: 12. 2 2016.] http://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/metoda_konecných_prvku_stavebni_mechanika_inte_raktivne.pdf.



Knap, Zdeněk. 2015. MOTOR S AXIÁLNÍM MAGNETICKÝM TOKEM PRO. *DIPLOMOVÁ PRÁCE*. BRNO : VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, 2015.

Kopylov, I. 1988. *Stavba elektrických strojů*. Praha : SNTL, 1988. ISBN 978-0-470-69516-6.

LACINA, DAVID. 2015. ELEKTRICKÝ STROJ S AXIÁLNÍM MAGNETICKÝM TOKEM. Brno : VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, 2015.

LAŠTOVICA, PETR. 2012. Použití hliníku a jeho slitin ve slévárenství. Brno : VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, 2012.

Limited, YASA Motors. 2016. <http://www.yasamotors.com/>. YASA. [Online] 1 2016. [Citace: 1. 2 2016.] <http://www.yasamotors.com/wp-content/uploads/2015/09/YASA-750-Product-Sheet.pdf>. 22735.

Liu Chengye, Shen Jianming. 2013. Design Technologies of Eddy Current Retarder Used in an Automobile. *Applied Mechanics and Materials*. Vol. 251, 2013, Sv. 134-138, Vol. 251.

Luedtke, A., Stahl, B. Gross, F., Harris, I., Schneider, G. 2001. Domänenstrukturen hartmagnetischer Phasen. místo neznámé : Metallogr, 2001.

M. LoBue, V. Basso, F. Fiorillo, G. Bertotti, J. Magn. 1999. Magn. Mater. 1999. str. 372. 196–197.

M.F. de Campos, J.C. Teixeira, F.J.G. Landgra. 2006. The optimum grain size for minimizing energy losses in iron. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2006.

M.J. Sablik, F.J.G. Landgraf, R. Magnabosco, M. Fukuhara, M. de Campos, R. Machado, F.P. Misselle. 2006. Fitting the flow curve of a plastically deformed silicon steel for the prediction of magnetic properties. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 15. 3 2006.

Macek, Pavel. 2011. NÁVRH A ANALÝZA ELEKTROMAGNETU. *Vysoké učení technické v Brně*. BRNO : Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 1.

MACH, PAVEL. 2008. MOŽNOSTI POVRCHOVÝCH ÚPRAV KOROZIVZDORNÝCH OCELÍ. *FAKULTA CHEMICKÁ ÚSTAV CHEMIE MATERIÁLŮ*. BRNO : VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, 2008.

Martin Fusek, Radim Halama. 2011. MKP a MHP. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2011.

Mattis, D. C., and John Bardeen. 1958. heory of the anomalous skin effect in normal and superconducting metals. *Physical Review* 111.2. 1958.

MAZANEC, K. 1983. Fyzikální metalurgie speciální. Nekonvenční typy materiálů, Učební texty VŠB-TU Ostrava. místo neznámé : VŠB-TU Ostrava, 1983.



MICHNA, Š. a kol. 2005. Encyklopedie hliníku. Děčín : Alcan Děčín Extrusions, 2005. 1. ISBN 80-890-4188-4. .

Novák, Václav. 2012. Výpočet ztrát v konstrukčních částech transformátoru. Plzeň : KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE - ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI, 2012.

PODRÁBSKÝ, T, NĚMEC, K, JULIŠ, M. 2008. Neželezné kovy a jejich slitiny. *Strojírenské materiály*. 2008.

Průvodce kurzy z fyziky. *Fakulata matematiky a fyziky*. [Online] Univerzita Karlova. [Citace: 1. 30 2016.] http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz_fyziky_pro_DS/www/fyzika.html.

Pyrhonen, J. 2008. Design of Rotating Electrical Machines. West Sussex, United Kingdom : John Wiley & Sons, 2008. ISBN 978-0-470-69516-6.

Radim Čech, Lukáš Buřval , Pavel Klaus. 2012. Měření elektrické pevnosti kompozitních materiálů a izolátorů. *Transactions on transport sciences*. 2012.

Remy International, Inc. 2010. remyinc.com. *Remy International, Inc.* [Online] 2010. [Citace: 1. 2 2016.] http://www.remyinc.com/docs/HVH410_r3_Sept_2010.pdf.

Ryška, Pavel. 2015. Točivé elektrické stroje - Část 2-1: Standardní metody určování ztrát a účinnosti ze zkoušek. Brno : CENELEC, 2015. str. 80.

ŘÍHA, TOMÁŠ. 2011. STUDIUM RADIAČNÍHO POŠKOZENÍ NÁDOBY REAKTORU VVER-440 JADERNÉ ELEKTRÁRNY. *DIPLOMOVÁ PRÁCE*. BRNO : VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, 2011.

Satapathy, D. K., et al. 2014. Magnetic proximity effect in YBa₂Cu₃O₇/La_{1-x}Ca_xMnO₃ multilayers. *Proceedings of the conference on neutron scattering*. 2014.

Sevcon. 2012. sevcon. www.sevcon.com. [Online] 2012. [Citace: 27. 8 2016.] http://www.sevcon.com/media/78436/gen4_size_8_july_2016.pdf.

SGTechnologies. 2014. SGTechnologies. www.sgtec.com. [Online] SG Technologies, 2014. [Citace: 6. 5 2014.] <http://www.sgtec.com/materials/soft-magnetic-components-smc>.

SCHÖNBAUER, JIŘÍ. 2011. Supravodiče a jejich využití v praxi. *Diplomová práce*. Plzeň : Západočeská univerzita, Elektrotechnická fakulta., 2011.

Siemens, W. 1872. Über eine neue Konstruktion magneto-elektrischer Maschinen. *Poggendorffs Annalen der Physik und Chemie*. 1872.

SINOMAG. 2016. Permanentni_magnety.pdf. www.magnety.cz. [Online] 2016. [Citace: 18. 8 2016.] http://www.sinomag.cz/sinomag.cz/data/sinomag/downloads/Permanentni_magnety.pdf.



Slusarek, Barbara, a další. 2014. Synchronous Motor with Hybrid Permanent Magnets on the Rotor. *Sensors 2014*. [Online] 2014. <http://www.mdpi.com/1424-8220/14/7/12425/htm>.

Sphere, Endless. 2010. Endless Sphere Technology. *endless-sphere.com*. [Online] 6. 7 2010. [Citace: 26. 8 2016.] <http://i.imgur.com/ePpg0lf.png>.

Teplý, B., Šmírák, S. 2011. Metoda konečných prvků. [Online] 2011. [Citace: 19. 2 2016.] <http://fast10.vsb.cz/brozovsky/mkp.html>.

Vnouček, Milan. 2010. Kompozitní materiály. *oddělení povrchového inženýrství*. Plzeň : Západočeská Univerzita v Plzni, 2010.

W. Wang, H. Wang and H. Shen,. 2016. Analysis of electromagnetic force and vibration characteristics for transverse flux permanent magnet motor,. *hinese Control and Decision Conference (CCDC)*. China : Yinchuan, 2016. ISBN 978-1-4673-9713-1.

W.J.Carr, Jr. 2001. *AC loss and macroscopic Theory of Superconductors*. London : Taylor and Francis, 2001. ISBN 0-415-26797-8.

WADA, N., AZUMAS, Y., TAKEDA, M., HIROI, Z. 2010. The relationship between the microstructure and the magnetic properties of nano-scale magnetic particles in a Cu-Fe-Co terory alloy. místo neznámé : *Int. J. Mat. Res.*, 2010. 3.

Yasa Motors company. *Yasa Motors 2015*. [Online] Yasa. [Citace: 15. leden 2016.] <http://www.yasamotors.com/products/>.

Zureks. 2007. Metoda konečných prvků. [Online] Wikimedia, 2007. [Citace: 19. 2 2016.] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Example_of_2D_mesh.png.



11 Publikační činnost

ČECH, R., BUŘVAL, L., KLAUS, P. Measuring the Electric Strength of Board Composite Materials and Insulators. *TRANSACTIONS ON TRANSPORT SCIENCES*, Ministry of Transport of the Czech Republic, 2011, ročník 4., č. 1., s. 19-24., ISSN 1802-971X.

ČECH, R., TOMČÍK, P., KULHÁNEK, J., TROJAN, R. Experimental Research on the Parameters of Electric Vehicles. *TRANSACTIONS ON TRANSPORT SCIENCES*, Ministry of Transport of the Czech Republic, 2012, ročník 5., č. 2., s. 91-98., ISSN 1802-971X.

ČECH, R., TOMČÍK, P. Measurement of combustion engine power characteristics, correction factors. *Sborník vědeckých prací VŠB - Technické univerzity, řada strojní*, 2010, ročník LVI, č. 1., s. 31-40., ISSN 1210-0471.

Publikace evidované v databázi Scopus:

TOMČÍK, Petr, Radim ČECH, Jiří KULHÁNEK a Jaromír ŠKUTA. Testing Equipment for the Research of Traction Battery Cells. In: *13 th International Carpathian Control Conference Conference*. High Tatras, Podbánské. Slovak Republic, 28-31.5 2012, s. 735-739. ISBN 978-1-4577-1866-3.

ČECH, Radim; TOMČÍK, Petr; KULHÁNEK, Jiri. Setting of combustion engine ECU parameters with use of knocking detection. In: *Carpathian Control Conference (ICCC)*, 2015 16th International. IEEE, 2015. p. 69-72., ISBN:978-1-4799-7369-9.



11.1 Funkční vzorek

TOMČÍK, Petr, Vladimír ZBOŽÍNEK, Radim TROJAN, Jiří KULHÁNEK, Martin JURÁNEK, Pavel KLAUS a Radim Čech. *Funkční vzorek elektromobilu*. Evidenční čís. 145/19-12-2014_F

TOMČÍK, Petr, Radim Čech, Pavel KLAUS. *Upravený motor VW Brouk boxer 1679 ccm se vstřikováním*. 139/18-12-2013_F

ČUDRNÁK, T., TOMČÍK, P., ČECH, R., KULHÁNEK, J. *Motor –Synchronní motor pro přímý pohon poloosy elektromobilu*. Jedná se o bezkartáčový elektromotor s kapalinovým chlazením statoru, s využitím lehkých kompozitových dílů. 105/29-11-2013_F

KULHÁNEK Jiří, Petr TOMČÍK, Martin JURÁNEK a Radim ČECH. *Zařízení pro testování baterií druhé generace*. 138/17-12-2012_F.

ČECH Radim, Petr TOMČÍK, Jiří KULHÁNEK, Martin JURÁNEK. *Zařízení pro testování baterií první generace*. 137/17-12-2012_F.

TOMČÍK, P., TROJAN, R., ČECH, R., KULHÁNEK, J., MOHYLA, P. *Experimentálně-výzkumné zařízení pro výzkum technologie zpracování silnými proudovými pulzy.*, evidenční čís. 006/18-02-2011_F

ČECH, R., TOMČÍK, P., BUŘVAL, L., KLAUS, P. *Stand pro měření elektrické pevnosti kompozitních materiálů.*, evidenční čís. 151/20-12-2010_F

TOMČÍK, P., TROJAN, R., ČECH, R., BUŘVAL, L., KLAUS, P. *Přestavba motokáry na elektropohon*, evidenční čís. 036/18-05-2010_F

TROJAN, R., TOMČÍK, P., ČECH, R., KLAUS, P., BUŘVAL, L., KULHÁNEK, J. *Pojízdná vývojová studie dvoumístného sportovního vozu s elektropohonem*, evidenční čís. 037/18-05-2010_F



11.2 Ověřená technologie

TOMČÍK, P., KLAUS, P., KULHÁNEK, J., ČECH, R., TROJAN, R., DOHNÁLEK, J. *Ověřená technologie stavby motoru VW boxer*, evidenční čís. 032/10-07-2013_OT

TOMČÍK, P., KLAUS, P., KULHÁNEK, J., ČECH, R., TROJAN, R., DOHNALEK, J. *Ověřená technologie montáže VW buggy*, evidenční čís. 031/10-07-2013_OT

11.3 Řešené grantové a rozvojové projekty

TA04030149, TAČR „Zvýšení bezpečnosti a spolehlivosti zdrojů elektrické energie pro dopravní prostředky“ (2014-2016)

TA01030430, TAČR „Aplikovaný výzkum a vývoj směrem ke zvýšení bezpečnosti vozidel s elektropohonem-elektromobilů a snižování jejich negativních vlivů na životní prostředí“ (2011-2014)

FT-TA4/021 MPO, Výzkum nových technologií zpracování ocelí pro energetiku (2007-2010)

CZ.1.07./1.1.07/11.0109 MSK OPVK 1.1 „Popularizace technických oborů u žáků ZŠ“ (2008-2011)

CZ. 1.07/3.2.07/02.0077 MSK OPVK 3.2 „Tvorba vzdělávacích modulů pro oblast dalšího vzdělávání“ (2011-2014)

SP2014/28 „Provozní měření a testování vlastností vybraných komponent prototypu vozidla“ (2014).

SP2013/17 „Experimentální studium vlastností vybraných komponentů pro ekologicky šetrnou individuální dopravu“ (2013).

SP2012/48 *Studium vlivů magnetických a elektrických polí na materiálové a technologické aplikace.* (2012)

SP2010/23 *Studium vlastností kompozitních materiálů.* (2011)



12 Seznam tabulek

Tabulka 1 Sledované parametry ve vztahu k funkčním proměnnými	46
Tabulka 2 Semikvantitativní rtg. mikroanalýza v hm. % v místech na Obr. 49	58
Tabulka 3 Vlastnosti materiálu EP GC 201 z katalogového listu firmy ARCO Technic	62
Tabulka 4 Naměřené rozměry zkušebních tyčí z materiálu X2CrNi18-9	64
Tabulka 5 Naměřené rozměry zkušebních tyčí z materiálu AlCu4PbMgMn	64
Tabulka 6 Naměřené rozměry zkušebních tyčí z materiálu EP GC 201	65
Tabulka 7 Naměřené hodnoty v rámci tahové zkoušky pro zkušební tyče z materiálu X2CrNi18-9	66
Tabulka 8 Naměřené hodnoty v rámci tahové zkoušky pro zkušební tyče z materiálu AlCu4PbMgMn	67
Tabulka 9 Naměřené hodnoty v rámci tahové zkoušky pro zkušební tyče z materiálu EP GC 201	68
Tabulka 10 Výsledky měření tvrdosti HBW2,5 pro materiál X2CrNi18-9	70
Tabulka 11 Výsledky měření tvrdosti HBW2,5 pro materiál ALCU4PBMGMN	70
Tabulka 12 Výsledky měření tvrdosti HBW2,5 pro materiál EP GC 201	70
Tabulka 13 Výsledky měření tvrdosti HBW2,5 pro materiál X2CRNI18-9	72
Tabulka 14 Výsledky měření tvrdosti HBW2,5 pro materiál ALCU4PBMGMN	72
Tabulka 15 Výsledky měření tvrdosti HBW2,5 pro materiál EP GC 201	72
Tabulka 16 Konektor K1, (panelový samec)	108
Tabulka 17 Konektor K2, (panelová samice)	108
Tabulka 18 Seznam měřených veličin motorové brzdy SF-902	118
Tabulka 19 Technická data elektromobilu StudentCar SCX	127



13 Seznam obrázků

Obr. 1 Elektromobil StudentCar SCX s axiálními motory	14
Obr. 2 Graf tříd účinnosti třífázových nízkonapěťových motorů 0,75 až 375kW (AG, 2016)	15
Obr. 3 Rozsah působnosti normativ IEC 60034-30:2008	15
Obr. 4 Mapa účinnosti axiálního motoru REMY HVH410 (Remy International, Inc, 2010)	16
Obr. 5 Mapa účinnosti axiálního motoru YASA 750 (Limited, 2016)	17
Obr. 6 Ukázka mapy účinnosti s plným rozsahem motoru (F. Badin1, 2015)	17
Obr. 7 Rozložení celkových ztrát v axiálním motoru v závislosti na provozním stavu (Clifford, a další, 2013)	18
Obr. 8 Rozdělení celkových ztrát v axiálním motoru (Clifford, a další, 2013)	18
Obr. 9 Řez axiálním motorem a popis jeho částí	19
Obr. 10 Silový rozbor zatížení ložiskové desky v axiálním motoru.	21
Obr. 11 Popis vířivých proudů ve vodivém materiálu	24
Obr. 12 Mapa rozložení magnetické indukce v materiálu v blízkosti cívky	25
Obr. 13 Hysterezní smyčka	26
Obr. 14 Změna rezistivity kovů s teplotou (C.L. Kane, 2008)	28
Obr. 15 Schematické zapojení experimentálního měření (Jianming Mai, 2011)	28
Obr. 16 Rezistivita v závislosti na prodloužení u nerezové austenitické oceli (Jianming Mai, 2011)	29
Obr. 17 Vypočtené hysterezní smyčky pro různé deformity 0%, 0,5%, 2% a 5%. (M.J. Sablik, 2006)	30
Obr. 18 Vypočítaná ztráta hystereze v závislosti na plastické deformaci. (M.J. Sablik, 2006)	30
Obr. 19 Permeabilita v závislosti na deformaci pro deformované a žíhané vzorky ve válcovaném (RD) a příčném (TD) směru (F.J.G. Landgraf, 2002)	31
Obr. 20 Vliv obsahu přísad na odpor slitiny železa a kobaltu (Chen., 1977)	32
Obr. 21 Vodivost v závislosti na hmotnostním podílu CNT (karbonové nanotrubičky) pro 100Hz. (A. Allaoui, 2002)	33
Obr. 22 Vodivost v závislosti na frek. a hmot. podílu MWNT (více stěnná nanotrubičky). (A. Allaoui, 2002)	33
Obr. 23 Závislost celkových ztrát na magnetické indukci při frek. 50Hz pro ocel s 5,5% Si. (J. Leichta, 2008)	34
Obr. 24 Závislost celkových ztrát na magnetické indukci při frek. 50Hz pro ocel s 6,5% Si. (J. Leichta, 2008)	35
Obr. 25 Příklady uspořádané a neuspořádané krystalické struktury	35
Obr. 26 Ztráty v deformovaných vzorcích před a po žíhání v závislosti na množství deformace, měřeno ve směru válcování a příčném (F.J.G. Landgraf, 2002)	36
Obr. 27 Hysterezní smyčky vzorků nedeformovaných, def. a žíhaných po deformaci. (F.J.G. Landgraf, 2002)	36
Obr. 28 Vliv velikosti zrna na ztráty Pt (Pc), Ph, Pa(Pp) a PCL(Pv). Příčném směru (M.F. de Campos, 2006)	37



Obr. 29	Vliv velikosti zrna na P_t , pH , PA , a PC , v příčném (T) a podélném (L) směru. (M.F. de Campos, 2006)	37
Obr. 30	Schéma rozložení cívek statoru	39
Obr. 31	Směr a orientace proudu a magnetické indukce vodiče.	39
Obr. 32	Schematický popis indukčního toku jhem motoru a ložiskovými deskami	40
Obr. 33	Zjednodušený magnetický obvod pól páru ve jhu motoru	41
Obr. 34	Vliv materiálu na magnetický indukční tok	41
Obr. 35	Schematický popis orientování magnetických domén v materiálu (HAJKO, 1982)	42
Obr. 36	Příklady možných uspořádání magnetických momentů	43
Obr. 37	Hysterezní smyčka (Luedtke, 2001)	43
Obr. 38	Hliníkový blok pro obrábění	48
Obr. 39	Vliv legujících prvků na elektrickou vodivost hliníku ve vztahu k vodivosti Cu. (Jaromír Drápala, 2012)	49
Obr. 40	Binární diagram Al a legur (LAŠTOVICA, 2012)	49
Obr. 41	Korozivzdorný blok oceli pro výrobu	51
Obr. 42	Vyznačení oblasti chemických složení různých typů korozivzdorných ocelí (MACH, 2008)	52
Obr. 43	Sklotexititová deska pro obrábění.	55
Obr. 44	Materiály označované AlCu4PbMgMn, X2CrNi18-9 a EP GC 201 připravené pro mikrostrukturní studium.	56
Obr. 45	Olympus IX70	56
Obr. 46	Mikrostruktura vzorku AlCu4PbMgMn. Optický mikroskop.	57
Obr. 47	Mikrostruktura vzorku AlCu4PbMgMn, detail. Optický mikroskop.	57
Obr. 48	Mikrostruktura vzorku AlCu4PbMgMn. SEM.	58
Obr. 49	Mikrostruktura vzorku AlCu4PbMgMn. SEM	59
Obr. 50	Mikrostruktura vzorku AlCu4PbMgMn. SEM.	59
Obr. 51	Spektrum odpovídající plošné analýze vzorku AlCu4PbMgMn. EDX.	59
Obr. 52	Mikrostruktura vzorku X2CrNi18-9 kraj, podélný řez. Optický mikroskop	60
Obr. 53	Mikrostruktura vzorku X2CrNi18-9 – kraj, podélný řez, detail. Optický mikroskop	60
Obr. 54	Mikrostruktura vzorku X2CrNi18-9 – střed, podélný řez. Optický mikroskop	61
Obr. 55	Mikrostruktura vzorku X2CrNi18-9 – střed, podélný řez, detail. Optický mikroskop	61
Obr. 56	Mikrostruktura vzorku EP GC 201. Optický mikroskop.	62
Obr. 57	Mikrostruktura vzorku EP GC 201, detail. Optický mikroskop.	62
Obr. 58	Multipurpose Servohydraulic Universal Testing Machine Series LFV 100kN	63
Obr. 59	Rozměry normalizované zkušební tyče pro tahovou zkoušku (Handbook, 2003)	64
Obr. 60	Zkušební tyče pro mechanickou zkoušku tahu materiálů ALCU4PBMGMN, X2CrNi18-9, EP GC 201	65
Obr. 61	Graf závislosti napětí na deformaci pro materiál X2CrNi18-9	66
Obr. 62	Graf závislosti napětí na deformaci pro materiál AlCu4PbMgMn	67



Obr. 63 Graf závislosti napětí na deformaci pro materiál EP GC 201	68
Obr. 64 Graf závislosti napětí na deformaci porovnání X2CrNi18-9, AlCu4PbMgMn, EP GC 201	69
Obr. 65 Brockhaus Messtechnik SST 30x250	73
Obr. 66 Vzorky 25x250x1 pro měření hysterezních smyček z materiálu X2CRNI18-9 a ALCU4PBMGMN.	73
Obr. 67 Graf z měření hysterezní smyčky pro materiál X2CrNi18-9	74
Obr. 68 Graf z měření hysterezní smyčky pro materiál AlCu4PbMgMn	74
Obr. 69 Zobrazení uspořádání točivého stroje s vnitřním a vnějším rotorem	75
Obr. 70 Základní topologie strojů s axiálním magnetickým polem (Gieras, 2004)	76
Obr. 71 Axiální stroj s vnitřním statorem a dvojitým vnějším rotorem: 1 – permanentní magnety, 2 – jádro rotoru, 3 – póly statoru ($2p = 8$), 4 – vinutí statoru. (Gieras, 2004)	77
Obr. 72 B-H magnetizační charakteristika oceli 11600 (Gieras, 2002)	78
Obr. 73 Póly ze Somaloy (SGTechnologies, 2014)	78
Obr. 74 B-H magnetizační charakteristika materiálu pólů, Somaloy (Slusarek, a další, 2014)	79
Obr. 75 Demagnetizační charakteristika magnetu NdFeB N48 (Gieras, 2004)	80
Obr. 76 Demagnetizační charakteristiky různých typů magnetů (Gieras, 2004)	80
Obr. 77 Vinutí rozložené v drážkách a vinutí soustředné (Pyrhonen, 2008)	81
Obr. 78 Parametry a provedení zlomkového vinutí pro definovaný počet Q, 2p. (Pyrhonen, 2008)	82
Obr. 79 Ukázka jedno a dvouvrstvého vinutí pro $2p = 20$, $m = 3$, $Q = 24$, $q = 2/5$	82
Obr. 80 Řídící jednotka elektromotoru Sevcon Gen 4 Size 8 (Sevcon, 2012).	83
Obr. 81 Základní rozměry magnetů a jejich rozmístění po obvodu rotoru, $2p = 20$	89
Obr. 82 Rozložení vinutí na pólech statoru, $Q = 24$, $2p = 20$, $q = 0,5$ a rozměr pólu	90
Obr. 83 Sestava axiálního motoru s dvojitým rotorem	91
Obr. 84 Rozložení magnetického pole na stroji	92
Obr. 85 Rozložení magnetického pole na pólech stroje	93
Obr. 86 Rozložení magnetické indukce ve vzduchové mezeře na 1/10 řezu	93
Obr. 87 Rozložení magnetické indukce na stroji při jmenovitém zatížení	95
Obr. 88 Rozložení magnetické indukce na stroji, póly a vzduchová mezera	95
Obr. 89 Průběh momentu stroje v závislosti na natočení rotoru	96
Obr. 90 Intenzita magnetického pole na povrchu magnetů rotoru	97
Obr. 91 Moment stroje v závislosti na natočení rotoru a velikosti napájecího proudu	97
Obr. 92 Plošné řešení magnetického pole. (Teplý, 2011)	99
Obr. 93 Síť konečných prvků v plošném zobrazení. (Zureks, 2007)	99
Obr. 94 Čtvrtinový výřez modelu motoru pro výpočet ztrát.	100
Obr. 95 Ztráty v hliníkových ložiskových deskách v závislosti na otáčkách rotoru	101
Obr. 96 Ztráty v ložiskových deskách z nerezové ocele v závislosti na otáčkách rotoru	101
Obr. 97 Závislost ztrát v ložiskových deskách na otáčkách motoru	101



Obr. 98 Demagnetizační křivka materiálu N45H (Sphere, 2010)	102
Obr. 99 Parametry a dostupné rozměry materiálu pólů (AB, 2016)	103
Obr. 100 Závislost smykového napětí na podmínkách vytvrzení lepidla Loctite Hysol 9394 (Aerospace, 2013)	104
Obr. 101 Obráběná statorová část v čelním a bočním pohledu	105
Obr. 102 Náhled na navinutou statorovou cívku	106
Obr. 103 Vlevo osazený plošný spoj ze strany TOP, vpravo detail snímače polohy a IR teploměru	107
Obr. 104 Póly s cívkami na sklolaminátové desce statoru, zatím nezapojeny	109
Obr. 105 Zapojovací schéma statoru	110
Obr. 106 Stator s vlepenými cívkami	111
Obr. 107 Postup vkládání magnetů do rotoru	112
Obr. 108 Sestavený rotor, patrná je vrstva epoxidu obklopující magnety	113
Obr. 109 Sestavený motor	114
Obr. 110 Část sestavy experimentálního zařízení.	115
Obr. 111 Schéma experimentálního měřicího zařízení (červeně - mechanické spojení, modře - informační spojení, zeleně – trakční silové spojení)	116
Obr. 112 Motorová brzda SuperFlow SF-902 (ASSURICH, 2016)	117
Obr. 113 Počítač motorové brzdy ovládacím pultem	119
Obr. 114 Klešťový ampérmetr UNI-T UT 207	120
Obr. 115 Multimetr UNI-T UT70A	121
Obr. 116 proudové sondy LEM DHAB	121
Obr. 117 VA6530 infrared thermometer	121
Obr. 118 Bateriový pack 320V - 17kWh	122
Obr. 119 Řídící jednotka motoru Sevcon Gen4 (Sevcon, 2012)	122
Obr. 120 Náhled testovaného motoru s ložiskovými deskami z leva XCr2Ni18-9, EP GC 201, AlCu4PbMgMn	123
Obr. 121 Základna pro uchycení motoru na motorovou brzdu s odsazením	124
Obr. 122 Schéma zapojení chladicího obvodu: červená - olejový chladicí okruh, modrá - vodní chladicí okruh	124
Obr. 123 Výměník Voda/Olej značky SWEP	125
Obr. 124 Spojka zajišťující axiální pohyb	125
Obr. 125 Schéma zapojení silové části měřicího zařízení	126
Obr. 126 StudentCar SCX	127
Obr. 127 Umístění axiálních motorů v elektromobilu	128
Obr. 128 Popis měřicího zařízení v útrobních elektromobilu: 1 - Compact RIO pro sběr dat za jízdy, 2 – Axiální prototypový motor, 3 – Řídící jednotka motoru Sevcon Gen 4.	128
Obr. 129 National Instruments cRIO	129
Obr. 130 Průběh teplot částí motoru při statické zkoušce pro materiál AlCu4PbMgMn	131



Obr. 131 Průběh teplot částí motoru při statické zkoušce pro materiál X2CrNi18-9	132
Obr. 132 Průběh teplot částí motoru při statické zkoušce pro materiál EP GP 201	133
Obr. 133 Průběh teplot statorového vinutí při statické zkoušce	134
Obr. 134 Průběh teplot ložiskové desky při statické zkoušce	135
Obr. 135 Průběh teplot rotoru při statické zkoušce	136
Obr. 136 Vyztužené ložiskové desky z materiálu AlCu4PbMgMn	137
Obr. 137 Výkonová charakteristika experimentálního motoru při dynamické zkoušce	138
Obr. 138 Průběh účinnosti experimentálních motorů v závislosti na otáčkách při plném zatížení	139
Obr. 139 Test oteplení pro městský provoz č.1	140
Obr. 140 Test oteplení pro kombinovaný provoz č.2	141
Obr. 141 Test oteplení pro dálniční provoz č.3	142
Obr. 142 Graf z měření při maximální rychlosti 205 km/h (120s)	143
Obr. 143 Graf z testu akceleračního zrychlení s plnou zátěží do maximální rychlosti 205 km/h	144
Obr. 144 Graf z měření brzdění pomocí rekuperace s plynulým náběhem rychlosti 150 km/h	145
Obr. 145 Souhrnný graf průběhu teplot částí motorů při statické zkoušce	148